

CNIC-01375

SWIP/AR(ZH)-001

核工业西南物理研究院

年 报

1998

中国核情报中心
核工业西南物理研究院
原子能出版社

CNIC-01375

SWIP/AR(ZH)-001

核工业西南物理研究院

年報

1998

中国核情报中心
原子能出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

中国核科技报告 CNIC-01375, SWIP/AR(ZH)-001: 核工业西南物理研究院 1998 年年报/潘传红等著. —北京: 原子能出版社, 1999. 10

ISBN 7-5022-2031-3

I. 中… I. 潘… ■. 核技术-研究报告-中国 N. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 20956 号

内 容 简 介

本年报全面地介绍了核工业西南物理研究院 1998 年度(1 月 1 日至 12 月 31 日)在核聚变与等离子体物理的理论、实验、工程与诊断技术和民品开发等方面的进展和科研成果,以及在有关学术期刊上发表文章的目录。

本年报可供从事有关核聚变与等离子体物理研究的科技人员、高等院校师生参考。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:武洁

社址:北京市海淀区阜成路 43 号, 邮政编号:100037

四川大学印刷厂激光照排中心排版

四川大学印刷厂印刷

开本:880×1230 mm 1/16 印张 8.5 字数 240 千字
1999 年 10 月成都第 1 版 1999 年 10 月成都第 1 次印刷

印数 1—400

定价:15.00 元

《核工业西南物理研究院年报》编辑委员会

主 编 潘传红

副 主 编 刘 平 严建成 钱尚介

常 务 编 委 丁亚清

编 委 (以姓氏笔划为序)

王树锦 刘 永 朱宇光 许增裕 严龙文

陈燎原 张年满 周才品 耿 漫 董家齐

廖志清

编辑部通讯地址 成都 432 信箱 113 分箱

邮政编码 610041

电话 (028)5581122-6483

电子信箱 dingyq@swip.com.cn

责任编辑 丁亚清

前 言

核工业西南物理研究院 1998 年年报和读者见面了。这是自 1983 年创刊之后,第一次由原子能出版社正式出版。它基本反映了一年来我院在受控核聚变研究以及民品开发等方面的主要科研成果。它的公开出版将有利于加强本院与国内外的交流与合作,促进科研和民品工作的发展。可喜可贺。

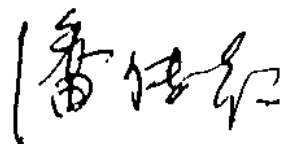
1998 年我院受控核聚变研究工作在核工业总公司和国家计委、财政部、国防科工委等上级部门的领导和支持下跨入了新的里程。HL-1M 物理实验,随着两项新的辅助加热系统(中性束注入、离子回旋共振系统)的建成并投入实验,HL-1M 装置上已拥有了中性束注入加热、电子回旋共振加热、离子回旋共振加热、低混杂波电流驱动与加热等目前国际受控核聚变研究中普遍采用的主要辅助加热和电流驱动手段;此外,具备了多发弹丸注入、超声分子束注入等先进齐全的加料系统以及世界先进的硼化、硅化、锂化等真空室第一壁处理技术;具有部分时空分辨能力的 20 多种诊断设备与技术。这些条件使我们的研究领域不断拓宽,研究内容不断深入,取得了一批在国内领先、具有国际水平的物理研究成果,这些成果在国内外重要刊物及学术会议上公布后,引起了国际聚变界的广泛关注,标志着我院受控核聚变研究向国际水平迈进,同时也为我院“核工业环流器实验技术重点实验室”申报国家级实验室创造了良好的条件。堆芯模拟装置 HL-2A 工程建设项目,经多方努力于 1998 年 2 月由国家批准正式立项,HL-2A 装置研制与配套工程建设已全面启动。

在 1998 年我院民品开发工作中,进一步调整了产品结构,缩短技术开发战线,加大了对有市场前景、能尽快实现产业化的重点项目的支持力度。1998 年列入核工业总公司重点支持的技术开发项目如等离子体处理造纸黑液、核磁共振成像仪样机研制、隔热膜和钛金镀膜生产线等取得了较大的进展。等离子体处理造纸黑液第一阶段木浆黑液处理中试系统建成并通过了联调和部省级验收,同时开展了关键部件等离子体枪的研制工作。核磁共振成像仪样机的研制取得了实质性进展,完成了原型磁体加工、安装、调试并达到了设计指标,可望在 1999 年内研制出商用样机。隔热膜已基本解决了主要的关键技术问题,达到了初级膜产品质量要求。钛金镀膜生产线正在按计划筹建。作为我院民品开发支柱产品之一的多媒体 LED 彩色大屏幕,在进一步提高产品的技术含量和质量的基础上,对产品的可靠性进行了深入研究,取得了良好的社会效益和经济效益。

在 1998 年中,我院在国内外各种正式刊物上发表论文 78 篇,在各种学术会议上交流论文 69 篇,获部省级以上重大科技成果奖 20 多项。

办好核工业西南物理研究院年报意义重大,希望我院各级领导和科技人员都要重视、关心、支持和积极参与这项工作,使年报越办越好。

核工业西南物理研究院 院 长
核工业西南物理研究院年报 主编



1999 年 6 月

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author (s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

目 次

1 托卡马克实验诊断与工程

1.1 分子束注入 HL-1M 装置等离子体的行为	姚良骅等(1)
1.2 HL-1M 装置放电中电子密度分布的峰化行为	邓中朝等(3)
1.3 弹丸注入对 HL-1M 装置等离子体 MHD 行为及电流密度分布的影响	郭干城等(5)
1.4 FIR 激光偏振干涉仪的模拟实验	邓中朝等(8)
1.5 HL-1M 装置的密度极限分析	周 艳等(9)
1.6 托卡马克逃逸电子输运系数的研究	郑永真等(11)
1.7 CCD 相机在观测弹丸消融过程中的应用	郑银甲等(14)
1.8 HL-1M 装置弹丸穿透特性的分析	唐年益等(15)
1.9 HL-1M 托卡马克等离子体转动数值研究	彭利林等(17)
1.10 中性束注入和离子回旋加热对 HL-1M 边缘极向流速和电场分布的影响	洪文玉等(18)
1.11 HL-1M 装置离子回旋波注入实验的边缘参数测量	严龙文等(20)
1.12 等离子体与石墨及其涂层相互作用实验研究	王明旭等(21)
1.13 HL-1M 装置的微机送气系统	崔成和等(22)
1.14 法拉第旋转角测量中多操作平台的转换	傅荟文等(23)
1.15 HL-1M 弹丸加料等离子体密度特性	肖正贵等(25)
1.16 中国环流器 2 号 A 装置(HL-2A)供电总体方案	王树锦等(27)
1.17 HL-1M 主机检修	卢 平等(28)
1.18 辅助加热高压电源微机反馈控制系统的研制与实验	胡浩天等(30)
1.19 80 MVA 脉冲发电机组剩磁启动自动稳压实验	刘学梅等(31)
1.20 高压调制器在 LHCD 系统中的长脉冲运行	王明伟等(33)
1.21 HL-1M 装置机械位移测量	李广生(35)
1.22 LAS 2000 谱仪计算机控制与数据采集	李 波等(38)
1.23 在 Windows95 下开发多发弹丸发射控制程序	李 立(39)
1.24 HL-1M 中性束注入器等离子体发生器电源	王德泰等(40)
1.25 HL-1M 中性束注入器真空烘烤温度监测	李 杨等(42)

2 聚变堆与聚变堆材料

2.1 改善 FEB 排灰效率并减少氚投料的探讨	邓柏权等(45)
2.2 FEB-E 氚循环系统计算机模拟	邓柏权等(47)
2.3 工程实验混合堆 FEB-E 核废物管理问题研究	冯开明(50)
2.4 FEB-E 3 维中子学屏蔽分析和计算	张国书等(53)
2.5 用 COSMOS/M 程序对 FEB 进行 2D 瞬态电磁分析	何开辉等(55)
2.6 聚变包层工艺和材料研究进展	许增裕(56)
2.7 钒合金氧化反应活化能的理论求解	湛继明等(57)
2.8 流出分支管道引起的 3 维 MIID 效应研究	许增裕等(59)
2.9 碳基材料中甲烷的热解吸(TDS)行为研究	刘 翔等(60)
2.10 V-4Cr-4Ti 合金在流动氩气中的高温氧化	湛继明等(62)
2.11 数控多通道转换系统的研制	魏文浩(64)
2.12 电子束热冲击实验装置项目竣工报告	肖征贤等(65)

3 等离子体理论与计算

3.1 微观粒子之间的非线性结合力.....	周海麟(67)
3.2 “磁约束聚变:原理与实验”一书前言	石秉仁(71)
3.3 等离子体加料过程中局部电荷分离及等离子体电漂移.....	石秉仁(72)
3.4 关于 ICRF 频段快、慢波分类的一个附记	石秉仁(75)
3.5 HL-1M 装置低杂波电流驱动与激光吹气等离子体中的类锯齿密度振荡	焦一鸣等(76)
3.6 相对论离子温度梯度驱动模计算.....	简广德等(78)
3.7 强流负离子束系统中电子偏转磁场分布的计算.....	简广德等(80)
3.8 强流负离子束系统的数值模拟研究.....	王惠三等(82)
3.9 四流体模型与 $m=1$ 内扭曲模稳定性分析	曲洪鹏等(83)
3.10 反磁剪切位形下撕裂模的稳定性分析	肖成馨(85)
3.11 涡旋演变方程的求解	徐文斌等(87)

4 技术开发与应用

4.1 离子注入对人造金刚石性能的影响.....	耿 漫等(90)
4.2 离化团束沉积装置的研制.....	唐德礼等(92)
4.3 建立核磁共振成像(MRI)系统用的医疗数据库.....	朱 明等(94)
4.4 开关电源特性研究及其性能改善.....	邵 斌(95)
4.5 隔热膜工艺参数的优化.....	曾长义等(97)
4.6 Ly11 铝合金微弧氧化实验研究	沈丽如等(98)
4.7 PSII 工业样机用平面磁控溅射靶设计及工艺实验	穆莉兰等(99)
4.8 强磁防垢除垢磁化器在锅炉上的应用	姬 静等(101)

5 其它

5.1 SWIP-RFP 装置弛豫参数的时间演变	李 强等(104)
--------------------------------	-----------

6 附录

6.1 1998 年在国内外正式刊物上发表的论文题录	(106)
6.2 1998 年在各种学术会议上发表的报告题录	(111)
6.3 1998 年参加的国际学术会议	(114)
6.4 1998 年参加的国内学术会议	(115)
6.5 1998 年来访的外国(及地区)学者	(117)
6.6 1998 年获得的部级科技进步奖项目	(117)
6.7 1998 年博士、硕士论文简介	(119)

1 托卡马克实验诊断与工程

1.1 分子束注入 HL-1M 装置 等离子体的行为^{①②}

姚良骅 唐年益 崔正英 徐德明 邓中朝 丁玄同 罗俊林 董贾福 郭干城
杨式坤 崔成和 肖正贵 刘德权 陈小平 严龙文 严东海 王恩耀 邓希文

关键词 分子束 密度剖面峰化 能量约束时间

一种新的气体加料方法——分子束注入,在 HL-1M 装置上进行了实验。脉冲高速分子束是由高压气体通过拉瓦尔(Laval)喷口形成的。准直的氢分子束平均速度约为 $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。一个分子束脉冲通过拉瓦尔喷口进入真空室的粒子数为 6×10^{19} 个。一系列氢分子束脉冲注入 HL-1M 低密度 ($\bar{n}_e = 4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$) 氢等离子体,氢粒子穿透深度可达到 12 cm,电子密度上升率达到 $3.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 而始终保持稳态,密度峰值为 $5.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。在氢分子束脉冲注入后 100 ms,电子密度剖面峰化因子达到最大值 $Q_n = n_e(0)/\langle n_e \rangle = 1.51$,其中, $n_e(0)$ 为中心密度, $\langle n_e \rangle$ 为体平均密度。由反磁测量得出能量约束时间 τ_E 为 28 ms,较在相同运行条件下常规喷气加料高 30%。分子束加料 τ_E 的改善和 Q_n 值的增加可与 HL-1M 装置的小弹丸注入和 ASDEX 装置 [Kaufmann M et al, Nucl. Fusion 28(1988)827] 的低速弹丸注入结果相比拟。除了氢的同位素效应之外,粒子注入的深度引起密度剖面峰化是约束改善的重要因素。因为在 HL-1M 装置常规喷气加料的 Q_n 值仅为 1.4。分子束加料后的粒子约束时间比加料前高 6 倍。

1 超声分子束

分子束源是一个充以一定压强和温度的工作气

体的小室。高压气体通过拉瓦尔喷口,束流的核心部分穿过一个分流器(skimmer)的小孔进入真空室,向前平动的气体粒子形成超声分子束。束流的其余部分被分流器刮离并被抽气系统抽除。

脉冲分子束具有高的瞬间强度、高速度、小的速度分布和角分布以及低的气体消耗。在本工作中,多脉冲分子束总长度为几十至几百 ms 即可满足 HL-1M 装置的实验需要。

通过拉瓦尔喷口进入真空室的气体流量可由下式计算

$$j = \left[\frac{\gamma R T_0}{\mu} \right]^{1/2} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma-1}{2(\gamma-1)}} n_0 A \quad (\text{粒子/s}) \quad (1)$$

式中, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ 是定压热容量与定容热容量之比(单原子分子 $\gamma = \frac{5}{3}$, 双原子分子 $\gamma = 1.4$), R 为摩尔气体常数, $8314 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}$, T_0 为气源温度、为摩尔分子(原子)质量(kg), n_0 为每立方米气体粒子数, A 为拉瓦尔喷口临界孔径的截面积。

2 分子束的穿透深度和密度峰化

分子束进入等离子体的穿透深度主要取决于靶等离子体的温度和密度。分子束的品质参数包括束

① 核工业科学基金(94C03033)和国家自然科学基金(19775011)资助项目

② 全文发表在 Nuclear Fusion, 1998, 38(4), 631

的速度和角分布,以及束流的通量密度。为了区分入射粒子和靶等离子体粒子,也为了减少壁和孔栏材料对入射粒子的吸附,本实验采用氦分子束注入低密度($\bar{n}_e=4\times 10^{18}\text{ m}^{-3}$)氦等离子体。氦粒子穿透深度为 12 cm,是用 PIN 二极管探测器阵列测定氦光谱线(He I 587.6 nm)强度沿径向分布并经 Abel 变换得到的。

HL-1M 等离子体的电子平均密度和密度沿径向分布分别用单道和多道 HCN 激光干涉仪测量。电子密度剖面峰化是分子束加料和控制边缘等离子体再循环的结果。氢再循环的下降是通过壁表面的硅化和纯氦辉光放电清除吸附于石墨孔栏的氢所致。分子束注入前靶等离子体的温度和密度与注入过程中能量约束时间与 Q_e 值的增长相关。如果在注入过程中靶等离子体的密度增高,并且密度剖面加宽,则能量约束时间下降。注入过量或再循环过大则会引起等离子体电流通道的收缩和 MHD 不稳定性并最终导致放电破裂。为了控制边缘再循环,减少入射粒子被器壁吸附,本实验采用氦作为工作气体。如第 4116 次放电,靶等离子体氢的密度为 $\bar{n}_e=4\times 10^{18}\text{ m}^{-3}$ 时注入 5 个氦分子束脉冲,在注入期间,电子密度上升率达到 $3.1\times 10^{20}\text{ m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$,放电始终保持稳态。注入结束后 100 ms,最大平均密度值为 $5.6\times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。

电子密度剖面峰化是这种加料方法的主要特征之一,氦束脉冲注入从 $t=150\text{ ms}$ 至 $t=250\text{ ms}$,在 $t=350\text{ ms}$ 时,电子密度剖面峰化因子达到最大值 $Q_e=n_e(0)/\langle n_e \rangle=1.51$ 。

3 分子束加料与约束改善

在 HL-1M 装置常规喷气加料实验中,能量约束时间的线性区末尾的电子密度值 $\bar{n}_e=2\times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。如继续提高密度,则 τ_E 值增长减缓。当工作气

体为氦和氢混合物,则能量约束时间的线性区的临界密度上升至 $n_e=2.5\times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。超过此密度值, τ_E 值继续以较慢的速率增长,直到 $n_e=6\times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。在密度范围 $n_e=(3.5\sim 6)\times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 内,分子束加料的能量约束时间较常规喷气加料高 30%。在密度范围 $n_e=(1\sim 3)\times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 内,HL-1M 装置小弹丸注入能量约束时间也较常规喷气加料高 30%。在上述能量约束比较实验中,放电参数为 $B_0=19\sim 2.3\text{ T}$, $q_{95}=5\sim 7$, $I_p=100\sim 120\text{ kA}$ 。

ASDEX 装置的低速弹丸注入结果可与上述能量约束实验相比拟。3 发速度为 $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的弹丸注入 ASDEX 欧姆加热氦等离子体,其穿透深度为 7 cm。注入后电子密度剖面峰化, $n_e(0)/n_e$ 大约高于注入前 10%。在注入过程的非稳态,能量约束时间从 60 ms 增长到大约 100 ms,明显的高于 ASDEX 装置常规喷气加料 $\tau_E(n_e)$ 曲线的线性段。除了粒子速度不同外,本文分子束加料的实验结果与 ASDEX 装置的低速弹丸注入有相似之处。上述两种加料方法效应的比较列于表 1。

粒子约束时间 τ_p 是根据边缘朗缪尔探针测得的向外粒子通量估算的。分子束加料使粒子约束时间比常规喷气加料有明显提高。例如第 4116 次放电,分子束加料前后 τ_p 值之比为 1:6,而与之对比的放电条件相似的常规喷气加料的第 4160 次放电,加料前后 τ_p 值之比仅为 1:3。

4 结论和讨论

本文提出并在 HL-1M 装置实现了用高速分子束注入托卡马克,获得约束改善的新的加料方法。本方法是对常规喷气加料的一种改进,其效果可与 HL-1M 装置小弹丸注入和 ASDEX 装置的低速弹丸注入结果相比拟。

长期以来,人们注意到中心加料,诸如弹丸注入

表 1 两种加料方法效应的对比

加料方法	工作气体	平均速度 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	靶密度 / 10^{19} m^{-3}	$\Delta\left[\frac{n_e(0)}{\langle n_e \rangle}\right]$	$\Delta\tau_E$	方法
MBI	He+H ₂	350	1.0	$\geq 10\%$	$>30\%$	稳态
慢速弹丸	D ₂	200	1.3	$\approx 10\%^{①}$	$\sim 50\%^{②}$	瞬态

① $n_e(0)/n_e$

② 非稳态

和高能中性束注入能够比常规喷气加料更好地改善托卡马克等离子体的约束。这种改善通常归结为密度峰化导致稳定的 η 模。如前所述,在 HL-1M 装置上非常低能中性束注入和 ASDEX 装置的低速弹丸注入也观测到约束改善的情况。与中心加料相比,这类实验的特点是加料粒子沉积在边缘而未在芯部。这类浅层注入也能得到类似于深层加料的约束改善,这意味着对于托卡马克等离子体可能存在一个临界位置,只要能在该位置出现密度峰化的任何加料方法都会取得好的约束。这个观点得到了理论研究(QU Wenxiao, Chinese Physics, 1992, 12; 935)的支持。该理论主要基于电子温度剖面相容性,可能存

在一个临界位置 $\rho_c = r/a \approx 0.7$, 整体约束特性至少对于电子基本上是由这个临界点的局域反常热传导决定的。

作者诚挚地感谢已故的孙湘教授对本工作的持续支持和鼓励,并在病中仔细审阅和修改英文文稿。作者感谢曲文孝、石秉仁、冉利波教授的有益讨论。黄锦华教授在假日中认真校正了英文手稿;在本工作的初创期间还得到朱祖凯(SHU T K)教授的积极支持和有益建议,在此一并致谢。

作者感谢 HL-1M 装置的全体工作人员的辛勤劳动。

1.2 HL-1M 装置放电中电子密度分布的峰化行为

邓中朝 周 艳 傅荟文 刘泽田 刁光跃 王恩耀

关键词 峰化 电子密度分布 约束

早在第 12 届 IAEA 等离子体物理与受控核聚变会议上曾讨论了由峰化密度分布引起的或与峰化密度分布相关的约束改善以及与离子温度梯度模 η_i 的抑制的可能关系^[1]。国际上一些装置的实验也确认了导致 $n_e(r)$ 分布峰化的许多放电状态,即弹丸(PD)深层加料、NBI 分子束的反向注入以及锯齿活性的自发抑制,同时也发现在导致改善 Ω 约束状态时,喷气速率降低也能引起向峰化密度分布的转变^[2]。对所有这些具有峰化密度分布情况共同的特征是相对于 Ω 加热或 L 状态放电 τ_e 、 τ_p 得到改善,可以说大多数改善了的约束是在峰化密度分布的情况下获得的。与高约束 H 模式约束改善的物理原因完全不同,峰化密度模式被认为是伴随抑制离子输运而出现的。在 HL-1M 装置的物理实验中,我们曾讨论了欧姆放电等离子体中 H_α 弹丸注入以及拉瓦尔喷嘴超声分子束注入送气后出现的密度分布状态变化以及相应峰化分布使约束改善的行为^[3]。最近,我们通过装置硅化及氦辉光放电清洗改善壁的条件,进一步研究了 LHW 的注入对电子密度分布的影响,以及超声分子束送氢气实现等离子体高密度运行同时电子密度的峰化状态的变化及其约束的改

善。

1 LHCD 期间的密度行为

低混杂波电流驱动(LHCD)是托卡马克装置中非感应电流驱动的一种有效方法。在 HL-1M 装置放电期间观测到在线平均电子密度 $\bar{n}_e \leq 0.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 区段 LHW 的作用促成电子密度分布趋于峰化,中心区密度提高(见图 1)。此时出现 H_α 辐射下降,边缘密度趋于下降,边缘电扰动受到抑制,约束趋于改善。电子密度 $\bar{n}_e > 0.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 时, LHW 注入欧姆放电等离子体时密度分布呈现瞬间平化过程,并且电子密度的分布与密度的变化密切相关,在密度上升时密度分布呈现平化,密度下降变化时出现峰化因子增加的分布,从图 1 可以看出, LHW 脉冲持续时间 300 ms, 大约 100 ms 后其峰化因子 $Q_n = N_e(0)/\langle N_e \rangle$ 可达 1.5~1.6, 对应于线平均密度 $0.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。通常, LHW 注入过程中密度提升 10%~40%, 并且这种密度涨落向等离子体中心传播(弛豫时间大约 12~16 ms), 波的作用表现出对边缘电子密度的影响快于中心等离子体密度变化, 因而出现初期密度分布平化变宽的趋势。以上分

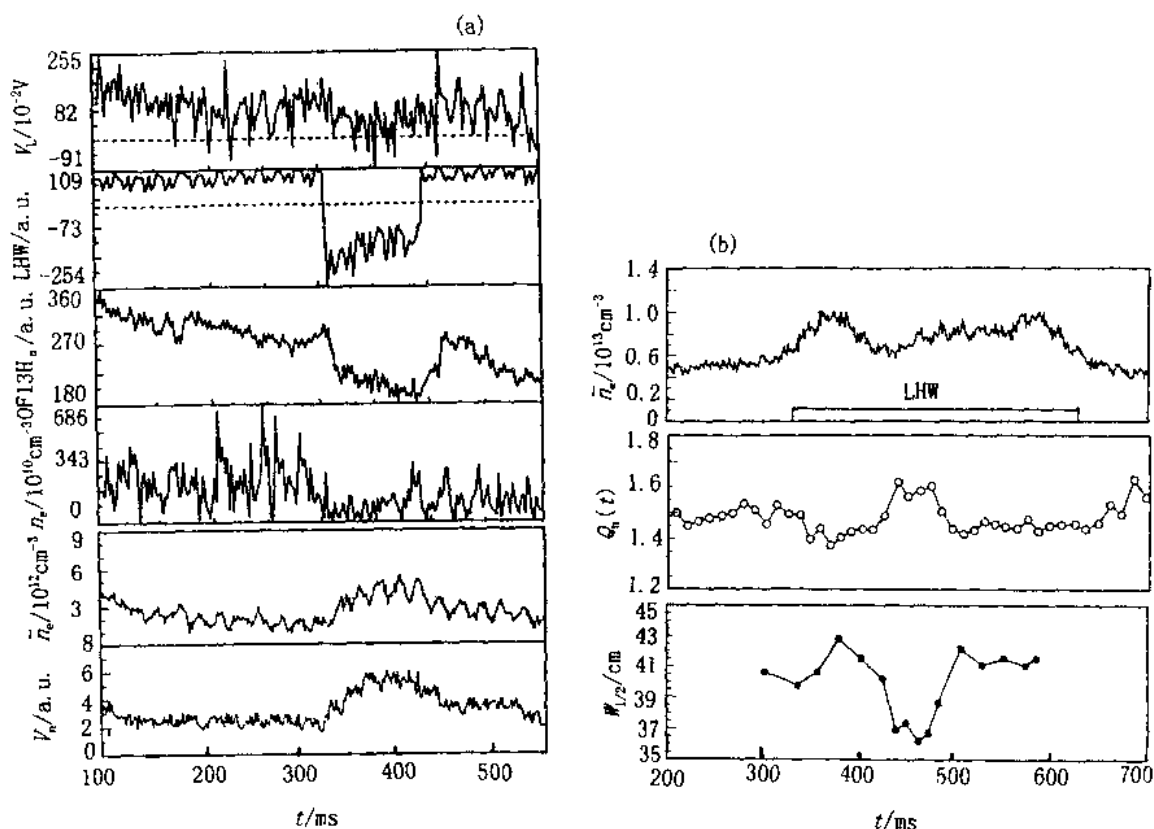


图1 LHW注入期间电子密度分布的变化

(a) V_L ——环电压, LHW——低混杂波持续脉冲, H_α ——中心弦 H_α 辐射, n_e ——探针测量等离子体边缘区电子密度, $\bar{n}_e$ ——线平均电子密度, 波加入时刻 $\bar{n}_{e,LHW} = 0.21 \times 10^{19} cm^{-3}$, V_e ——积分密度 $N_e(r_0, t)/$ 积分密度 $N_e(r_0, s_{H_\alpha}, t)$ 之比。第 4820 次放电 ($I_p = 96 kA$, $B_t = 1.65 T$), $q_a = 5.6$, LHW 功率 190 kW。 (b) $\bar{n}_e$ ——线平均电子密度, 注入时刻 $\bar{n}_{e,LHW} = 0.57 \times 10^{19} cm^{-3}$, $Q_n(t) = N_e(0)/(N_e)$ 密度峰化因子, $W_{1/2}$ ——密度分布剖面的半宽度。第 4918 次放电 ($I_p = 105 kA$, $B_t = 2.28 T$), $q_a = 7.0$, LHW 功率 260 kW, 脉冲持续时间 300 ms。

析可看出波的穿透深度与 LHW 加入时电子密度的关系。在较高密度的欧姆放电期间, LHW 作用于等离子体时离子温度出现提高, 并且基本随着注入时刻线平均电子密度的提高而增加, 离子温度升高时 H_α 辐射增强, 电子密度分布未形成明显峰化趋势, 等离子体电子密度增加使密度峰化的可能性减小。

2 超声分子束改变密度分布

由拉瓦尔喷嘴所产生的 MBI 以高速气团射入等离子体时, 使电子密度明显增加, 其作用类似于弹丸加料行为, 只是 MBI 对密度的上升速率稍慢 $2.9 \times 10^{11} cm^{-3} \cdot ms^{-1}$ 左右, 而弹丸加料时密度的上升速率大约 $1.07 \times 10^{13} cm^{-3} \cdot ms^{-1}$ 。氢分子束加料可使装置等离子体电子密度爬升到 $7.5 \times 10^{13} cm^{-3} \sim 8 \times 10^{13} cm^{-3}$, 估计已接近或达到当时运行条件的密度极限。一般情况下连续脉冲 MBI 送气可提高电子密度又可形成较峰化的电子密度分布, 峰化因子 $Q_n = 1.45 \sim 1.55$ 左右。在等离子体电流斜上升放电运

行时 (200 kA, 2.3 T), 超声分子束注入使电子密度峰化因子上升到 1.65。由图 1(b) 可见此时线平均电子密度为 $3.8 \times 10^{13} cm^{-3}$, 在电流坪区电子密度趋于峰化分布期间氧杂质没有增加, H_α 辐射下降, 边缘密度也趋于下降, 以上现象同样表现出约束改善, 此时电子温度无明显变化。在现有放电条件下, 普通的程序脉冲补充送气等离子体运行比较稳定, 密度可达到 $6.2 \times 10^{13} cm^{-3}$, 电子密度分布无明显变化, 所谓峰化因子通常低于 1.4, 维持在 1.35 左右。对 MBI 和 GP 两种送气状态的比较, 可以看出 MBI 送气有利于等离子体密度分布峰化的形成 (图 2), 并且大体上在趋于低密度变化时峰化因子变大。

3 结束语

在目前 HL-1M 装置托卡马克放电条件下, 等离子体低密度状态 LHCD 易诱发电子密度分布趋于峰化, 并表现出约束行为的改善。在高密度状态下运行的等离子体 LHW 投入时电子密度分布没有形

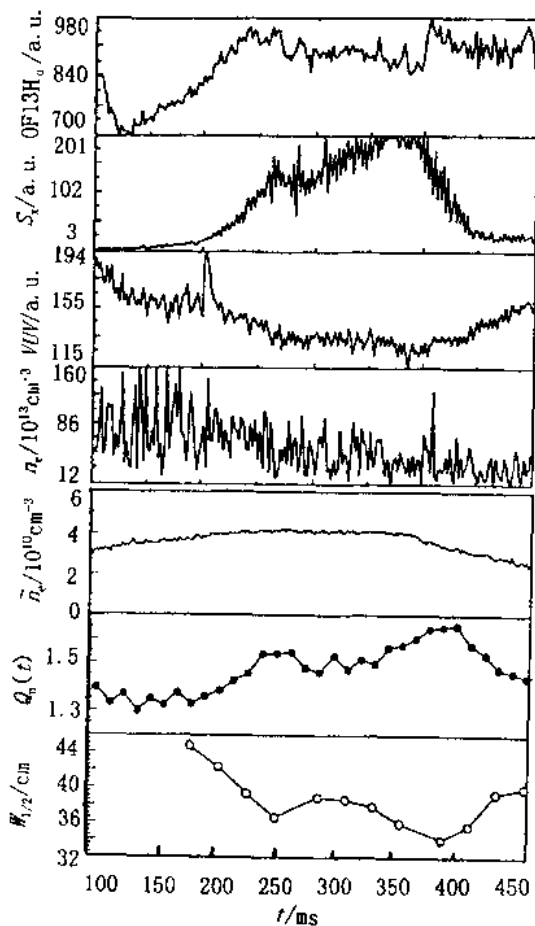


图2 MBI 超声分子束送气的放电特征

OF13H α ——H α 辐射; S $_x$ ——中心弦软 X 射线辐射; VUV——真空紫外 OM 线; n_e ——边缘等离子体密度; $\bar{n}_e$ ——线平均电子密度; $Q_n(t)$ 密度峰化因子; $W_{1/2}$ ——密度分布剖面半宽度。

成明显峰化趋势,却呈现出离子温度提高的倾向,并且与加入时刻的线平均电子密度有关。此外,MBI 可以使氢等离子体进入到高密度状态运行,并使电子密度分布的峰化参数加大,约束得到改善。电子密度的峰化参数变大伴随着密度分布变窄或等离子体通道变窄,峰化的作用减弱了等离子体与器壁孔栏相互作用的几率。从 HL-1M 装置电子密度分布变化的过程来看,伴随着密度趋于峰化其分布变窄,中心密度降低。

作者对诊断室所有同仁给予的有益帮助和支持表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Parker R R. Experiments on Tokamak. Nucl. Fusion, 1989, 29(3): 489
- 2 Gruber O, Fahrback H U, Gehre O, et al. Auxiliary Heated Multipellet-fuelled Discharges in ASDEX and Influence of Density Profile Shape on Confinement. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1988, 30(11): 1611
- 3 邓中朝,周艳,刘泽田等. HL-1M 装置电子密度测量及密度峰化分布研究. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 27

1.3 弹丸注入对 HL-1M 装置等离子体 MHD 行为及电流密度分布的影响

郭干城 钟云泽 刘 仪 傅炳忠

关键词 MHD 不稳定性 锯齿振荡 电流密度分布

弹丸注入所引起的等离子体响应与注入前等离子体本身的条件和状态、扰动参数以及弹丸穿透深度有关。我们曾对弹丸注入后的等离子体 MHD 行为及约束性能进行了研究^[1,2]。本文主要根据 PIN 光二极管阵列探测器所探测到的 1~10 keV 能量的软 X 辐射扰动,定性分析多发弹丸注入对 HL-1M

等离子体 MHD 行为及电流密度分布的影响。测量结果表明,弹丸注入可以改变等离子体电流密度分布,抑止或激发 MHD 不稳定性。

1 弹丸抑止锯齿振荡

锯齿振荡的出现表明等离子体有着峰化的电流

密度分布,中心安全因子 $q(0) < 1$,即等离子体内部存在 $q=1$ 的磁面。弹丸注入后锯齿被抑止表明内破裂消失,由内部 kink 模引发的等离子体中心区域的不稳定性得以控制,约束有所改善;同时也表明弹丸穿透到 $q=1$ 磁面附近的中心区域,并且平化了等离子体的电流密度分布。图 1 是 MHD 不稳定性与弹丸注入的关系。从图 1(a)中看到,弹丸抑止了锯齿和 $m=1$ 先兆模振荡, $q=1$ 磁面消失,电流分布被平化。有时锯齿被弹丸抑止而 $m=1$ 模还存在,这表明 $q=1$ 磁面并没有消失,电流分布仍然峰化,只是内部破裂得到了有效的抑止。图 1(b)是饱和了的 $m=1$ 模被弹丸抑止的典型波形,显然电流分布被平化了。

弹丸注入可以改变等离子体的 MHD 行为以及电流密度分布,既可能抑止 MHD 不稳定性,也可能激发不稳定性,特别是当弹丸注入到等离子体中心区域附近时对内部不稳定性行为影响更大。不稳定性与电流密度分布有关,所以用 MHD 行为的变化定性分析电流的峰化还是平化是切实可行的。

弹丸注入后所形成的磁轴外破裂是经常可观测到的,不过,迄今为止我们还未看到过 $q(0) < 1$ 情况下的复合锯齿,即有两个 $q=1$ 面的负剪切位形。磁轴外破裂前的稳定化放电期间的约束改善情况还不十分清楚和肯定,负剪切位形的形成主要还是杂质在等离子体中心的积累。我们将对负剪切位形作进一步的研究。

2 弹丸激发锯齿振荡

弹丸注入可能会抑止锯齿振荡、平化电流密度分布;与此相反,实验中也经常观察到弹丸注入会激发出锯齿振荡。图 1(c)是在 4 发弹丸注入的一次放电中观测到的锯齿波形,它是在第 3 发弹丸注入后出现的。注入前软 X 辐射强度很弱,电子温度和电子密度都较低,注入后电子温度快速下降,电子密度大幅上升并且在随后的短时间(< 10 ms)内明显峰化。中心区域的软 X 辐射强度增加并呈现出叠加有 $m=1$ 先兆模的典型的锯齿振荡波形,等离子体中心出现了 $q=1$ 的磁面。可能是弹丸注入后等离子体参数(特别是密度)的急剧变化使放电快速进入锯齿振荡稳定运行区。实验中还观察到弹丸注入即刻激发出较大幅度的 $m=1$ 模而并不诱发内破裂锯齿振荡,而且 $m=1$ 模会很快发展为蛇形(Snake-like)扰动[图 1(d)],这时温度分布峰化,电流通道收缩,密度和温度信号上均叠加有 $m=1$ 的扰动。等离子体中心温度没有下降,但温度剖面变得很窄,这表明弹丸只冷却了 $q=1$ 磁面以外的等离子体。可能由于

高温电流通道的快速变化使得电流分布变得峰化,诱发出 $m=1$ 模;又由于 $m=1$ 的扰动基本上局限在 $q=1$ 磁面以内,所以也很有可能是弹丸注入激发出的蛇形密度扰动。

3 弹丸激发 Mirnov 振荡和逃逸不稳定性

在温度和密度都比较低的情况下,弹丸注入往往会激发出大幅度的 Mirnov 振荡,或者激发出逃逸不稳定性(RWI),或者逃逸不稳定性与 Mirnov 振荡交替出现[图 1(e)]。它们或是以爆发的形式出现,或是紧跟着弹丸的注入而呈现快速增长的特征。另外,当托卡马克放电运行在足够低的密度时,会产生超热逃逸电子尾部,引起电子速度的各向异性分布可以驱动反常 Doppler 不稳定性,即逃逸不稳定

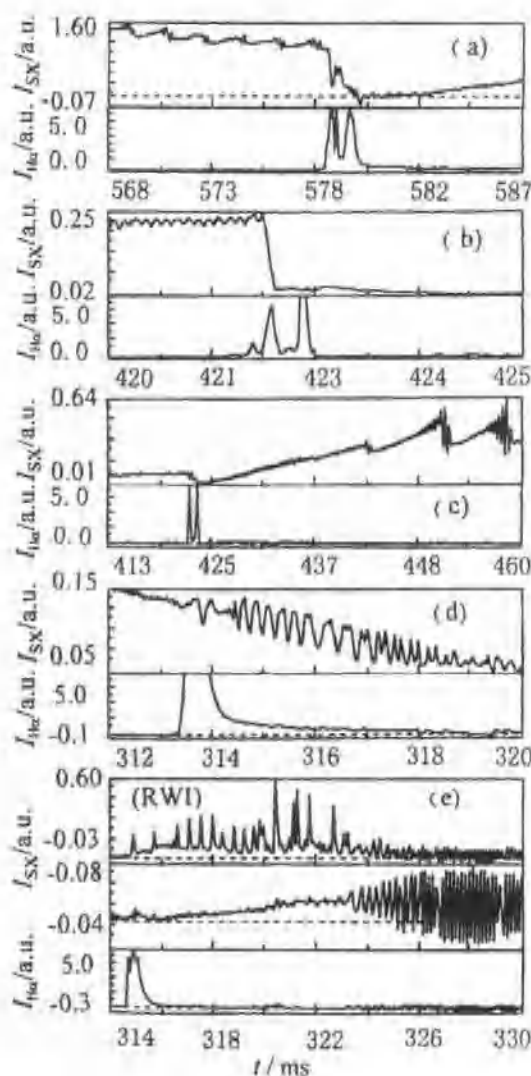


图 1 弹丸对 MHD 的影响

(a)弹丸抑止锯齿;(b)弹丸抑止 $m=1$ 模;(c)弹丸激发锯齿;(d)弹丸激发 $m=1$;(e)弹丸激发 Mirnov 振荡和逃逸不稳定性。

性。在 HL-1 和 HL-1M 欧姆放电中都观测到了这种不稳定性,并且在低杂波电流驱动(LHCD)期间低杂波会激发出逃逸不稳定性^[3,4]。测量结果表明弹丸的注入也同样会引起电子速度分布的各向异性化而激发出逃逸不稳定性。

4 弹丸注入与环形破裂 (annular disruption)

根据弹丸注入后等离子体 MHD 不稳定性的变化情况,在某种程度上可以定性推断电流密度分布的不同变化。除去上述情况外,弹丸注入也会使放电进入较长时间的稳定状态,一般表现为无锯齿放电,在这期间软 X 辐射强度增加,温度分布可能变成中空,密度一般呈现为峰化形分布,等离子体约束得到改善。但在这期间的电流密度分布还不清楚,因为我

们目前还无法测定等离子体的安全因子 $q(r)$ 值,不过可以根据软 X 辐射强度扰动的某些特征定性分析电流密度分布。图 2 示出了两种不同类型的破裂,即环形破裂(破裂发生在磁轴以外 $r=6.5$ cm 处)和芯部破裂(破裂中心位于磁轴),环形破裂发生在第 2 发弹丸注入前,是首发弹丸注入后发展形成的。由于多道 HCN 测得的密度分布没有环形破裂的迹象,所以反应在软 X 辐射强度的环形破裂就可以被认为是温度扰动引起的,也就是说电子温度时空分布信号也会表现出环形破裂的特征。这样,破裂前的电流密度分布就是中空的。从图 2 中看到,环形破裂发生前有时会有内部不稳定模的发展。根据相位关系以及模的旋转频率,图 2 中所示的模是 $m/n=3/2$ 模,估计电流呈中空分布,中心 $q(0)>1$,也就是说等离子体内部存在负剪切磁面。

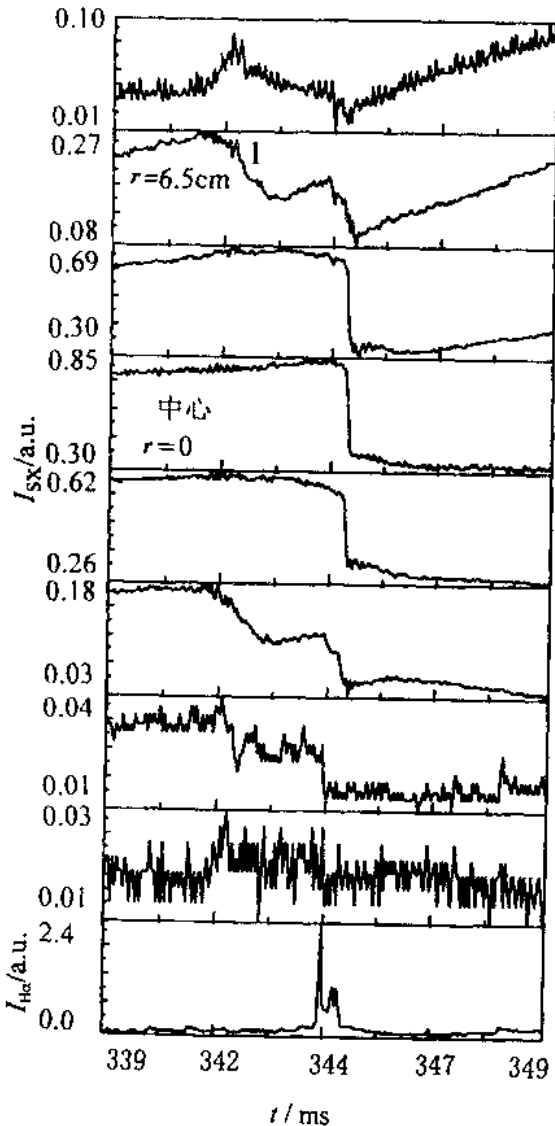


图 2 等离子体破裂

1——环形破裂。

参 考 文 献

- 1 郭干城,钟云泽,傅炳忠等. 弹丸注入对 HL-1 等离子体锯齿活性的影响. 核聚变与等离子体物理, 1994, 14(2): 44
- 2 刘仪,郭干城,钟云泽等. Improved Plasma Confinement Characteristics and Central MHD Activity in Pellet Fuelled in HL-1M Experiment. 中国核科技报告, CNIC-01279, SIP-0105. 北京:原子能出版社, 1998
- 3 郭干城,刘仪,钟云泽等. LHCD 期间 HL-1M 装置等离子体中心区域的 MHD 行为. 核聚变与等离子体物理, 1998, 18(增刊): 39
- 4 郭干城,刘仪,钟云泽等. LHCD 对 HL-1M 软 X 辐射和扰动的影响以及驱动对约束改善的分析(核西物院内部报告)

1.4 FIR 激光偏振干涉仪的模拟实验

邓中朝 周 艳 傅荟文 刘泽田 郦文忠

关键词 偏振面旋转 极向场 FIR 激光偏振干涉

在 Tokamak 装置极向场分布的测量中,远红外(FIR)激光偏振干涉是一种可行的办法,它通过探测束偏振面的法拉第旋转测量极向场 B_θ 的变化。原则上沿着等离子体截面不同弦同时进行偏振面旋转测量,结合电子密度分布数据就可推演出极向磁场的分布,并进一步获得等离子体电流密度分布的信息。国际上很多大中型托马克装置例如 JET、TFTR、TEXTOR 均建立了多道 FIR 激光干涉/偏振仪系统,对极向场进而对电流密度分布实现了测量。早期法国 TFR 600 装置曾使用 HCN 激光干涉仪的修改道完成了法拉第旋转测量^[1],德国 TEXTOR 装置改造了 9 道 Veron 型 FIR 激光干涉仪,实现了电子密度和安全因子 q 分布的同时测量^[2,3],等离子体相移变化 $\Delta\varphi$ 和法拉第旋转角 Ω 灵敏度大约分别为 $0.01 \times 2\pi$ 和 0.15° 。为了测量 HL-1M 及以后新建装置极向场分布实现等离子体优化控制,我们选择了以 FIR 激光干涉仪为基础并作光路修改的方案,使用室温热释电探测器外差探测和小信号检测技术,依此开展局部技术预研并进行模拟法拉第旋转角的校准试验,摸索适应在实际托卡马克装置放电下实验的设计参数,在此基础上进一步研制多路 FIR 激光/偏振干涉仪。

1 测量工作原理

具有线偏振的波矢 k 沿着磁场方向传播时($k//$

B)可分解为等振幅的右旋 R 和左旋 L 的圆偏振波,在它们通过等离子体期间其相速度随局部区域电子密度的不同面变化,由于对应折射率互不相同,其结果经等离子体传播后合成线偏振面将发生旋转。如果传播方向与托卡马克环向场 B_ϕ 垂直(O 波)则环向场的影响消失,此时极向场 B_θ 在光束传播方向的分量 $B_{\theta\parallel}$ 对偏振面的旋转起主要作用,因此在垂直于环向场方向传播的线偏振波穿过等离子体时将产生一个偏振面的法拉第旋转角 $\Omega^{[1]}$

$$\Omega[\text{deg}] = 1.50 \times 10^{-20} \lambda^2 \int_0^L N_e \cdot B_{\theta\parallel} \cdot ds$$

和一个相位变化 $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi[\text{rad}] = -2.82 \times 10^{-17} \pi \int_0^L N_e \cdot ds$$

式中, λ 探测波波长单位 μm , N_e 电子密度单位 cm^{-3} , $B_{\theta\parallel}$ 极向场分量单位 kG , L 探测弦长单位 cm 。

2 桌面实验描述

用 $337\mu\text{m}$ 波长激光作为探测束测量法拉第旋转效应。被旋转偏振面的光束会变换一定量光束功率入射到线栅复合器上,并被部分反射与来自衍射光栅的参考束相干由 D_r 探测器接收产生差拍信号 $S_F \approx \sin \Omega \cdot \cos(\Delta\omega t + \varphi)$, 它的振幅比例于 $\sin \Omega$, 如果偏振面的法拉第旋转角较小则信号振幅变化比例于 $\Omega(t)$ 。我们设计的模拟试验光路如图 1 所示,

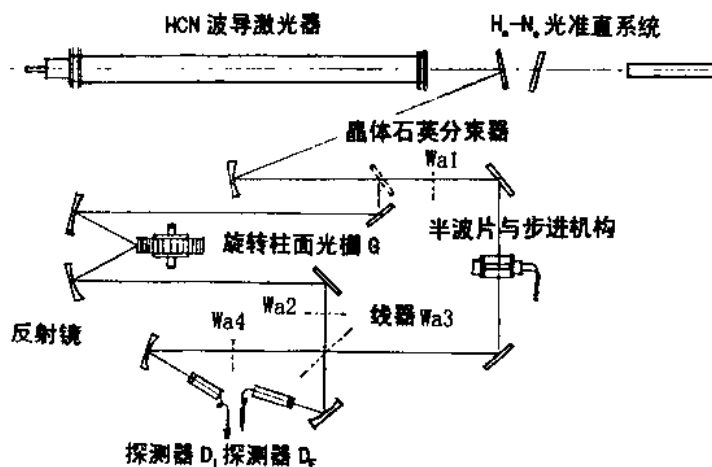


图 1 模拟法拉第旋转的 FIR 激光偏振干涉仪光路图

Wa1、Wa2——线栅起偏器; Wa3——线栅光束复合器; Wa4——线栅检偏器。

用步进电机带动晶体石英所磨制的半波片模仿等离子体旋转光束的偏振面 E , 步进控制 (5~200) 步/s 可调, 步进角 0.3° 。所用 HCN 激光器线偏振 EH_{11} 模输出稳定功率大约 8 mW。线栅 Wa_3 作为光束复合器安排线栅方向与初始束偏振方向平行, 检偏器 Wa_4 线栅放置与原始光束偏振方向成 45° 以便满足线偏振光相干条件。激光干涉仪中仍以旋转柱面光栅的衍射产生 10 kHz 的多普勒频移参考光束, 全部光路均按高斯光束传输设计。

由偏振面旋转所产生的垂直于初始束偏振分量与来自旋转柱光栅衍射束在探测器 D_F 上混频产生差拍信号, 为抑制噪声实现小信号探测并取得好的测量精度, 我们采用锁相放大, 干涉仪的差拍信号 S_i 作为锁相环中相敏检波器的参考信号。线路中低通滤波时间常数 τ (1~100) ms 可变, 这种互相关检测对彼此间位相差变动十分灵敏, 经模拟除法器后产生与旋转角成正比关系输出信号电压。

3 实验结果

在光束偏振面 E 平行于半波片光轴时旋转角为零, 数据电平位于零位线, 此时信号 S_F 最小, 且接近于系统的本底噪声。控制半波片绕中心光轴旋转变输出信号电压与角度变化关系曲线如图 2 所示。震动对测量试验有明显影响, 它正好处于旋转角变化的频段范围。目前测量系统的噪声波动较大, 小于 1° 角的变化还不能明显识别出, 有待进一步探索提高精度。

此项工作属自然科学基金托卡马克等离子体参数优化中支持项目。作者对王恩耀研究员、张光阳副研究员以及 102 室领导的支持表示感谢。

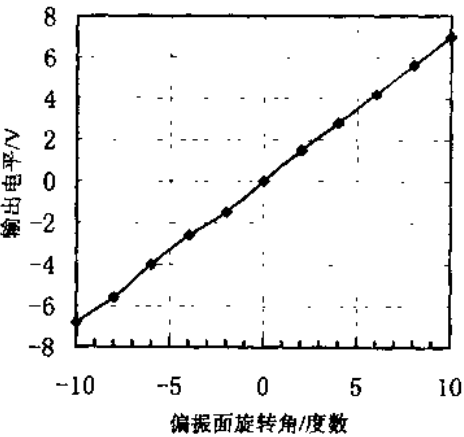


图 2 输出信号电压与波片旋转角相对校准曲线

参 考 文 献

- 1 Soltwisch H, TFR Equipe. Experimental Test of Far-Infrared Polarimetry for Faraday Rotation Measurements on the TFR 600 Tokamak. *Infrared Phys.*, 1981, 21: 287
- 2 Soltwisch H. Current Distribution Measurement in a Tokamak by FIR Polarimetry. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, 57(8): 1939
- 3 Koslowski H R, Soltwisch H. Electron Density and q Profile Measurements with the Far-IR Interferometer-Polarimeter on the TEXTOR Tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 1997, 34~35: 143

1.5 HL-1M 装置的密度极限分析

周 艳 邓中朝 王恩耀 傅荟文 刘泽田

关键词 密度极限 送料方式 壁处理 约束

HL-1M 装置自 1995 年完成工程调试, 已进行了 4 年物理实验。在进行壁处理条件、高效送料技术和射频波电流驱动研究的同时, 也逐年拓宽了 HL-1M 装置的运行范围和品质参数。图 1 是 HL-1M 装置运行区域的 Hugill 图。HL-1M 比 HL-1 向更高密度的运行区域扩展, 其 H 值 $\frac{n_{e, \max} \cdot R q_0}{B_i}$ 由 6.9×10^{19}

$m^{-2} \cdot T^{-1}$ 提高到 $15 \times 10^{19} cm^{-2} \cdot T^{-1}$, 增长了 2.2 倍。

在讨论 HL-1M 密度极限之前, 定义本文所选用的密度极限放电的特征: 破裂前, 等离子体位移无大的移动, 环流、纵场保持稳定, 在外界的馈气下、线平均电子密度缓缓上升直至达到破裂。破裂瞬间前的密度为我们所用的极限密度。线平均电子密度由