

我国等离子体研究概况

蔡诗东 李银安

(中国科学院物理研究所)

洪明苑

(国家自然科学基金委员会)

本文介绍了我国在核聚变和高温等离子体、基础等离子体、天体等离子体和空间等离子体、低温等离子体及其应用、等离子体理论等方面的研究概况。文中不仅介绍了实验装置的参数和主要的诊断设备,而且还简述了当前实验和理论方面的研究课题。

我国核聚变和等离子体的研究工作早在1958年就开始了,在70年代得到了进一步的发展,并开始了空间等离子体的研究工作。近年来,又开始了等离子体应用的研究。现将正在从事核聚变、空间等离子体及等离子体应用研究的单位列举如下:

(1) 中国科学院所属的研究单位有:合肥等离子体物理研究所、物理研究所、力学研究所、电工学研究所、电子学研究所、上海光学精密机械研究所、空间物理研究所、地球物理研究所、北京天文台、南京紫金山天文台、云南天文台、化学研究所、成都有机化学研究所、长春应用化学研究所、广州化学研究所等。

(2) 中国工业系统所属的研究单位有:西南物理研究所、中国原子能科学院、航天航空工业部有关研究所、机械工业部北京自动化研究所、轻工业部化学电源研究所、上海纺织科学院等。

(3) 大学系统有:中国科学技术大学、北京大学、清华大学、复旦大学、南京大学、大连理工大学等约40多所高等院校,其中大多数院校开展了等离子体应用研究工作。

现将研究概况介绍如下:

一、聚变实验研究

1. 托卡马克

这是我国核聚变研究的主要研究项目。现有九个托卡马克实验装置正在运行。

(1) 托卡马克 CT-6B

这是中国科学院物理研究所在1974年运

行的我国第一个托卡马克 CT-6 的改进形。

CT-6B 具有铁芯变压器但无导体壳,其主要参数如下:。大半径 45cm, 等离子体小半径 10cm, 纵场 13kG, 变压器磁通量 0.28Wb, 等离子体电流 30kA, 电流脉冲宽度 20—100ms, 电子温度 200eV, 电子密度 $(1-4) \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 能量约束时间 1—2ms, 粒子约束时间 3—5ms。

诊断设备有:软、硬 X 射线探头,软 X 射线成象,激光荧光光谱,真空紫外光谱,可见光光谱,多道二极管光学探头, LiTaO₃ 探头,四极杆质谱仪,罗果夫斯基线圈, Mirnov 探针,正弦余弦磁探针、中性粒子能谱仪,电子回旋发射测量,红宝石汤姆逊散射,远红外激光干涉和散射测量,远红外法拉第旋转测量,微波干涉测量等等,并配有数据采集系统和计算机自动控制系统。

目前的研究课题有:(1) 电子回旋共振加热 (ECRH), (2) 阿尔芬波加热, (3) 低频调制电流驱动, (4) 能量和粒子的输运, (5) 在磁岛式随机轨道结构条件下的电子扩散,以及具有随机限制器的托卡马克实验等等。最近利用了频率为 34.34MHz、脉宽为 10ms、输出功率达 200kW 的回旋管对等离子体进行微波加热,加热效果十分明显。

(2) 托卡马克 HT-6B

这是中国科学院合肥等离子体物理研究所于1981年投入运行的空芯变压器托卡马克装置,大半径 45cm, 等离子体小半径 12.5cm, 纵场 10—12kG, 等离子体电流 40—50kA, 等离子体电子温度 200—300eV, 等离子体平均密度

$(2-3) \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$.

诊断设备有: ECH 加热测量装置, 4mm 微波干涉仪, 可见、近紫外空间扫描双单色仪, 高速摄影仪, 真空紫外空间扫描光谱仪, 辐射测量仪, 罗果夫斯基线圈, 朗谬尔探针, 硬 X 射线探测器, 软 X 射线涨落测量仪, 汤姆孙散射仪, 电荷交换中性粒子能谱仪, HCN 干涉仪, ECE 测量仪, 多普勒加宽光谱仪, 软 X 射线能谱仪等, 并配有数据处理系统.

主要工作有: (a) 降低等离子体中杂质含量 ($Z_{\text{eff}} \approx 1$), (b) 用外加螺旋场及 ECRH 局域加热抑制撕裂模引起的 MHD 不稳定性.

(3) 托卡马克 HT-6M

这是中国科学院合肥等离子体物理所于 1984 年投入运行的另一台托卡马克装置, 其主要参数如下: 大半径 65cm, 等离子体小半径 20cm, 纵场 15kG, 等离子体电流 150kA, 放电持续时间 150ms, 等离子体电子温度 600—800eV, 等离子体离子温度 300—400eV, 等离子体平均密度 $(5-7) \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 能量约束时间 10ms.

主要工作有: (a) 高功率辅助加热实验 (包括 1MW 中性束注入加热、1MW 离子回旋频率高频加热、100kW 电子回旋频率高频加热和电流分布), (b) 高比压等离子体的平衡和稳定性实验; (c) 低混杂波电流驱动实验, (d) 等离子体输运过程及边界层物理实验.

(4) 托卡马克 HL-1

这是西南物理研究所于 1985 年 4 月正式投入运行的装置, 是我国目前规模最大的托卡马克实验装置, 其主要参数为: 内、外真空室大半径 102cm, 内真空室(波纹管, 壁厚 0.05cm) 小半径 25—27cm, 外真空室(铜壳, 壁厚 5cm) 小半径 32cm, 孔栏半径 20cm, 大环轴线上纵场 5T, 纵场组件数 16, 变压器芯柱最大磁通变化 $1.75 \text{V} \cdot \text{s}$. 已达到的等离子体参数为: 主场 34kG, 等离子体电流 220kA, 等离子体电流平均时间 400ms, 等离子体电流持续时间 1.3s, 等离子体密度 $4.7 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, 电子温度 1.8keV, 离子温度 870eV, 有效电荷数为 1.5,

安全因子 2.8, 能量约束时间 16ms.

诊断设备有: 电磁测量系统 (如罗果夫斯基线圈、单匝环、位移探针、极向磁探针组、环向磁探针组), 软 X 射线二极管阵列及吸收比较测量探测器阵列, HCN 多道干涉仪, 多频多道微波干涉仪, 激光散射, 多道 H_{α} (激光吹气), 多道量热器, 静电探针, 量热器, 有效 Z 测量, 单道微波 (2mm, 4mm) 干涉仪, SiLi 谱仪, 中性粒子分析器, ECE 测量, 真空紫外光谱, 弯晶谱仪, 锂束探针, ECRH 测量, 表面分析站, 进行数据处理的 VAX/750 专机, 等等.

物理与工程实验研究课题有: 平衡实验, 稳定运行区的测定与扩大, 长脉冲放电实验, 电流驱动, 稳定性实验, 加热实验, 器壁的放电清洗实验, 喷钛实验, 等离子体与器壁的相互作用的研究, 杂质控制, 主机工程问题的研究, 二次充气与预电离放电实验等.

(5) 小托卡马克微环、预试环和 KT-5

前两个装置建在西南物理研究所, 后一个建在中国科学技术大学. 其主要参数见下表 1.

表 1

主要参数	微环	预试环	KT-5
大半径 R(cm)	20	26	30
小半径 a(cm)	4.5	75	10
纵场 B_z (kG)	12	20	4.5
等离子体电流 I_p (kA)	15	12	5
等离子体密度 n (cm^{-3})		10×10^{13}	
电子温度 (eV)	40	30	50
能量约束时间 τ_E (ms)		10	
变压器芯体	空气芯	铁芯	空气芯

主要研究课题为: 破裂和逃逸电子, RF 加热, 大半径压缩, 离子伯恩斯坦波传播, 等离子体与器壁相互作用等等.

(6) 环形多极器托卡马克 MPT-X

这是合肥等离子体物理研究所的一个带有四组内导体环的托卡马克装置, 其主要参数为: 大半径 40cm, 等离子体小半径 8cm, 等离子体电流 60kA, 放电持续时间 30ms, 纵场 10kG, 等离子体电子温度 100eV, 等离子体平均密度 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$.

主要研究目标: (a) 八极场对托卡马克等离子体 MHD 不稳定性的影响; (b) 用八极场和不封闭导电壳来形成非圆位形的托卡马克等离子体和控制轴对称位移不稳定性; (c) 托卡马克和八极器两种运行状态的相互过渡过程。

(7) 非圆截面托卡马克

这是西南物理研究所的另一装置, 其大半径为 48cm, 截面为 13cm × 37cm, 纵场为 4kG。

2. 箍缩和等离子体焦点

(1) 场反箍缩 FRP-1B

这是中国科学院物理研究所将 1984 年投入运行的场反箍缩 FRP-1 扩建后的装置, 现已投入运行。该装置设有偏磁场、预加热场、主压缩场、镜场、多极场、触发场以及 RF 预电离源, 其总储能约为 140kJ。

诊断设备有: 磁探针、逆磁探针、高速分幅相机、光谱仪和 Mach-Zehnder 激光干涉仪。

研究课题集中在场反位形的形成, 磁力线的再连等方面。

(2) 非圆截面反场箍缩

这是西南物理研究所正在运行的装置, 其主要参数为: 大半径 48cm, 小半径 10cm, 纵场 0.3T, 上升时间 200—500 μ s, 等离子体电流 80—130kA, 衰减时间 1—2ms, 等离子体的密度和温度分别为 10^{19} — 10^{20} cm⁻³ 和 100eV, 约束时间 > 100 μ s, 比压值 ~ 0.1。

主要的诊断设备有: 各种探针, 光谱仪, 多道软 X 射线测量设备, 红宝石激光汤姆孙散射仪及干涉仪等。

目前研究的课题是 q 值从 $q < 1$ 到 $q > 1$ 演变期间等离子体的 MHD 行为及其机制。

(3) 小型直管角向箍缩装置

该装置建在中国科学技术大学。主要工作是, 利用激光干涉仪测量具有时-空分辨的等离子体电子密度。

(4) 小型高压喷气乙箍缩装置

这是清华大学正在运行的装置, 其总电容量为 1.3 μ F, 最大工作电压为 150kV (一般在 80—100kV 条件下运行)。

(5) 200kJ 等离子体焦点装置

这是清华大学正在运行的装置, 其主要参数为: 总电容量 200 μ F, 最高工作电压 50kV, 内、外电极的半径分别为 230mm 和 270mm。在工作电压为 300kV 和峰值等离子体电流为 1.5 MA 时的最高 X 射线产额为 11J。

主要的诊断设备有: 针孔照相机, MCP X 射线照相机, XRD (X 射线二极管), X 射线产额测量系统等。

目前的研究工作集中在 X 射线的产额和机制, 以及在传播阶段的等离子体行为。

(6) 100kJ 等离子体焦点装置

这是清华大学正在运行的又一等离子体焦点实验装置, 其主要参数为: 总电容量 99 μ F, 最高工作电压 50kV (通常在 21kV 条件下运行), 内、外电极半径分别为 65mm 和 150mm。观察到的 X 射线产额为 11J。

3. 磁镜

(1) 热电子环磁镜装置, 首先建于中国科学院物理研究所, 后移到中国科学院合肥等离子体物理研究所, 其主要参数为: 镜中心场强 4—4.5kG, 镜比 2.2—4, 镜间长度 38cm, 微波输入功率 8kW, 微波频率 20.4GHz, 真空室直径 25cm。

主要研究课题为: (a) 热电子等离子体的形成和加热机制, (b) 高比压热电子环对等离子体的稳定作用, (c) 大镜比条件下的热电子等离子体的扰动行为。

(2) 西南物理研究所也正在开展磁镜方面的工作。

4. 会切装置

西南物理研究所正在开展这方面的研究工作(如高频堵漏等)。

5. 惯性约束

(1) 利用六束钕玻璃激光器产生六路光束的爆聚实验研究工作已在中国科学院上海光学精密机械研究所开展多年, 每束激光输出功率为 $(5—10) \times 10^{10}$ W, FWHM 为 1ns/100ps。

诊断设备有: 一维空间分辨能力消象散掠入射光栅光谱仪, 带有针孔成象的透射光栅光

谱仪,法拉第筒电荷收集器, X射线光谱仪, X射线针孔相机等等。

研究工作有:快离子发射,二次谐波发射,自聚焦及成丝不稳定性,密度轮廓变陡及自身磁场效应的理论,共振吸收和受激布里渊散射,得到了 Al^{10+} 离子的 $5f-3d$ 跃迁 (10.5 \AA) 的软 X 射线激光等。

最近建成一台功率输出为 10^{12} W 的二路光束的钽玻璃激光器,在短波长方面得到了初步结果。

(2) 电子束聚变实验:这是中国原子能科学院开展的研究工作,建成了 80 GW 的强电子束加速器,电子能量为 1 MeV ,脉宽为 70 ns ,束流为 30 kA 。研究内容有:脉冲功率技术;粒子束惯性约束聚变;阴极面积为 $38 \times 5 \text{ cm}^2$ 和电子束流面积为 $36 \times 4 \text{ cm}^2$,强度为 46 kA 的二极管中的电子束收缩效应;电子束在靶上能量沉积的测量;用电子束泵浦的 KrF 激光(能量为 19.5 J ,脉宽为 70 ns) 和 XeF 激光(能量为 5 J) 的产生。

二、基础等离子体实验

1. 稳态等离子体装置 (SPD)

此装置在中国科学院物理研究所于 1987 年运行。真空室直径 0.8 m ,长度 1.6 m ,电子密度 $10^8-10^9 \text{ cm}^{-3}$,电子温度 3 eV 。

研究课题是声波或静电波孤立子,密度涨落等。

2. 非中性等离子体实验装置

目前此装置正在中国科学院物理研究所调试运行。真空室直径 13 cm ,长度 1.2 m ,磁场为 $400-600 \text{ G}$,电子密度 $10^7-10^8 \text{ cm}^{-3}$,电子温度 $\sim 1 \text{ eV}$ 。研究课题是纯电子等离子体中粒子的输运和波现象。

3. 双层等离子体实验装置

此装置建在中国科学技术大学,主要研究离-声波孤立子,离声-朗缪尔波的相互作用。

三、天体等离子体和空间等离子体研究

1. 太阳物理

主要研究太阳大气层的 MHD 结构,太阳耀斑机制,太阳风,太阳磁场结构及粒子的加速。这些课题分别在各天文台、北京大学和南京大学开展研究。

2. 星际物理

主要研究太阳扰动的传播,粒子和能量输运,等离子体不稳定性及辐射。这些工作在各天文台、空间物理研究所、南京大学和北京大学进行。

3. 日地空间物理

主要研究太阳风的磁层等离子体的相互作用,粒子加速和能量输运,等离子体不稳定性,无碰撞激波,湍流,双层,反常输运,等离子体辐射,磁力线再连,弓形波中的等离子体现象,磁顶,磁暴和极光,中性层环电流等。这些工作在中国科学院的空间物理研究所、物理研究所、力学研究所,北京大学和北京航空航天大学进行。

4. 太阳厘米波射电峰观察及其机制

这在南京大学,北京大学和各天文台进行研究。

5. 电离层物理

主要研究电离层低纬度哨声,低纬度非均匀性,通讯及吸收等,研究工作在武汉大学和北京大学进行。

6. 天体等离子体物理

主要研究脉冲星、超新星、中子星、射电发射及星际物质等,这些工作分别在各天文台、北京大学、南京大学、中国科学技术大学和北京师范大学等单位进行。

四、低温等离子体及其应用

低温等离子体包括近热力学平衡的热等离子体和非热力学平衡的冷等离子体(或称低气压等离子体)。由于国防和工业部门的需要,早在 60 年代,我国已经开展了热等离子体的研究,并进行磁流体发电的探索。70 年代以来,等离子体在机械、化工、冶炼行业获得更广泛的应用。冷等离子体是国际上近十多年活跃的领域。我国自 80 年代初期便越来越多的人从事这方面的研究、开发和应用工作。

热等离子体研究已经发展到较高水平,例如高压电弧空气加热器功率大于 5MW, 直流加热器功率达 200kW, 电极寿命大于 200 小时,热效率在 70% 以上, 射频电感等离子体发生器可达 100kW. 热等离子体在航空、航天、机械加工、冶金、化工等方面已有较多应用. 与此同时,建立了光学、激光、探针等诊断技术,进行了一些电弧基本过程的研究和计算机模拟计算. 磁流体发电短时间的电功率约 600kW, 800 小时的连续功率为几十 kW. 等离子体冶金已进行了中小规模的试验. 在化工方面,热等离子体用于天然气和原油的裂解,用于难熔、超硬、超细粉末的制备,等离子体喷涂耐热、防腐、耐磨材料,并用于航空发动机及火箭喷管等. 微型等离子体弧炬做成医用手术刀,并进行了临床试验.

冷等离子体研究已经相当活跃,离子镀在装饰物镀层方面的应用已十分广泛. 近几年来,离子镀在增强、增韧、氮化、碳化和钛化方面的应用水平有较大提高. 等离子体增强化学气沉积已成为半导体领域重要的手段,类金刚石膜、金刚石膜、以及光学保护膜已有许多单位在进行探索. 低温等离子体在大规模集成电路中的应用,使刻蚀线条的分辨率达微米级. 对等离子体聚合气体成分富集膜和生物亲合膜也已开展研究,有的已获可喜成果. 等离子体表面处理正力图改善天然纤维的可纺性和染色性,改善化学纤维的吸湿性、粘附性和抗静电性等. 用低温等离子体处理高分子材料,可以大大提高其复合材料的粘接强度. 由于这方面研究属于交叉学科的新领域,许多工作尚处于探索阶段,应用前景十分广阔,但有待深入开展机理性研究,并努力探讨应用的突破口.

五、等离子体理论研究

1. 西南物理研究所的理论工作

西南物理研究所的理论工作有以下几方面:

(1) 较多的力量集中在与核聚变有关的问题上,如对托卡马克、仿星器、磁镜等装置中的

等离子体平衡与约束的研究,对磁流体型如扭曲气球模、交换模、撕裂模等的不稳定性研究.

(2) 加热及电流驱动的研究.

(3) 对混沌等非线性过程的研究.

(4) 聚变-裂变混合堆的工程和物理的研究.

(5) 建立平衡位形及输运等的计算程序.

(6) 设计并考虑 HL-1 装置的二期工程的改建及其物理问题.

2. 中国科学院合肥等离子体研究所的理论工作

该研究所的理论工作包括高温等离子体理论,结合实验和工程的应用课题. 现在的研究重点有:

(1) 托卡马克中等离子体的平衡、输运及稳定性.

(2) 碰撞对波驱动电流的影响,低频波动电流及波在等离子体中的传播和吸收特性.

(3) 混沌现象,吸引子和分叉行为,湍流.

(4) 等离子体输运,波对输运过程的影响,远离平衡态理论.

(5) 混合堆的堆芯物理,中子理论,磁体结构、设计及热工问题.

(6) 程序库的建设.

3. 中国科学院物理研究所的理论工作

该研究所的理论研究工作有以下几方面:

(1) 非均匀、高比压等离子体的不稳定性及输运,其中包括广义的回旋动力论方程、普遍色散关系、漂移色散函数、漂移波以及 ∇T_i , DCLC, LHD, 哨声和其它不稳定性.

(2) 具有高能分量粒子的等离子体的不稳定性,例如研究高能分量粒子对气球模、 $m=1$ 的内扭曲模和阿尔芬模的稳定性影响,提出了在托卡马克和仿星器中到达第二稳定区的直接途径,磁镜中热电子对不稳定性的影响,ICRF 和 ECRH 产生的高能捕获电子分量.

(3) 曼塞 (Maser), 其中包括中空电子束产生的电子回旋曼塞、不稳定性、辐射功率和损失锥激发的极区千米波辐射.

(4) 电阻性不稳定,其中包括撕裂模、半磁

(下转第 638 页)