

专题: 磁约束等离子体中的高能粒子

HL-2A 装置上成像型中性粒子分析器的物理设计和初步实验结果*

颜筱宇¹⁾²⁾ 何小斐²⁾ 于利明^{2)†} 刘亮²⁾ 陈伟²⁾ 石中兵²⁾ 卢杰²⁾
魏会领²⁾ 韩纪锋¹⁾ 张轶泼²⁾ 钟武律²⁾ 许敏²⁾

1) (四川大学原子核科学技术研究所, 辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610065)

2) (核工业西南物理研究院, 成都 610041)

(2023 年 5 月 11 日收到; 2023 年 7 月 25 日收到修改稿)

在 HL-2A 装置上发展了基于硫化锌银闪烁体的成像型中性粒子分析器, 对磁约束聚变等离子体中高能粒子 (EP) 的分布、能量和螺距角等关键信息, 以及 EP 与磁流体不稳定性之间的相互作用等物理问题进行了研究. 在中性束注入路径上逃逸出的具有等离子体中快离子能量和螺距角信息的中性粒子, 通过由入射孔和碳微晶体膜片组成的准直系统后转化为离子, 在装置边缘磁场中受洛伦兹力偏转而撞击到闪烁体屏上. 通过分析发光点的位置和光强度, 可以推断出装置中快离子的位置、能量和螺距角等关键信息. 在 HL-2A 装置高能粒子物理实验中, 通过该诊断和理论计算初步证实了长寿模不稳定性是由能量、螺距角和位置分别为 $E = 12.5\text{--}32\text{ keV}$, $\theta \sim 149.2^\circ$ ($v_{\parallel}/v \sim 0.86$) 和 $R = 170.5\text{--}171.5\text{ cm}$ 的芯部快离子激发.

关键词: 快离子, 成像型中性粒子分析器, 长寿模不稳定性

PACS: 52.55.Fa, 52.55.Pi, 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.72.20230768

1 引言

磁约束聚变装置中的大功率辅助加热和电流驱动系统 (如中性束注入 (NBI)、离子回旋波加热、电子回旋波加热/电流驱动和低混杂波电流驱动 (LHCD) 等), 以及氘氘聚变反应会产生大量的能量偏离等离子体温度的高能粒子 (EP), 包括快离子 (FI)、快电子和阿尔法 (α) 粒子等. 一方面, EP 可以有效地提高等离子体的温度, 驱动等离子体无感电流, 维持等离子体燃烧等. 另一方面, EP 会和磁流体力学波通过波-粒子相互作用而产生各种高能粒子的不稳定性^[1-5]. 这些不稳定性反过来会与 EP 相互作用导致其发生显著的扩散、对流

等输运和损失, 进而引起辅助加热和电流驱动效率下降, 而携带着大量能量的损失 EP 会对装置第一壁造成破坏, 甚至会导致其过热和融化^[6]. 因此, 了解 EP 在等离子体中的分布、能谱、输运和损失对理解等离子体加热、电流驱动、能量、粒子输运以及约束等至关重要. 为了实现热离子和快离子的深入研究, 国际上已发展了中性粒子分析器 (NPA)^[7]、快离子损失探针^[8]、快离子 α 辐射测量 (FiD α)^[9]、法拉第筒^[10] 和汤姆孙相干散射^[11] 等诊断系统.

NPA 诊断系统的工作原理是使用准直系统收集通过电荷交换从等离子体中逃逸出来的携带有离子信息的中性粒子, 此后利用气体或者固体电荷剥离器使中性粒子变成带电离子, 最终使用能量分析器等对离子的能量、质量和通量等进行分析,

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFE03020000, 2018YFE0304100)、四川省科技计划 (批准号: 2022NSFSC1823, 2022ZYD0019) 和核工业西南物理研究院西物创新行动人才项目 (批准号: 202103XWCXRC003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yulm@swip.ac.cn

得到离子温度/能量 (E)、径向位置 (R)、通量和螺距角 (θ , 实验上一般用 v_{\parallel}/v 表示, 即 $\cos\theta = v_{\parallel}/v$, 其中 v_{\parallel} 表示快离子平行于磁场的速度, v 表示离子的总速度) 等离子体的关键信息. 自 20 世纪 70 年代 T-10 托卡马克^[12] 发展 NPA 测量等离子体中的离子温度和快离子的速度分布函数以来, NPA 通过对各种功能模块的优化, 已经发展出了测量离子温度 (及分布)、快离子的分布和能谱、等离子体中粒子的质谱等功能. 目前, NPA 已经作为一种常规诊断被广泛应用于托卡马克和仿星器上^[13–18]. 欧洲联合环 (JET) 装置上的 $E//B$ (粒子分析功能单元中电场 (E) 平行于磁场 (B)) NPA 不仅可以实现 5–740 keV 范围的快离子能量测量, 还可得到氘-氘粒子的质谱^[19]. 在未来的 ITER 装置上已经设计了两套 NPA 诊断系统, 分别用于测量燃烧等离子体中氘氘离子的能量和质谱, 以及能量在 MeV 量级的 α 粒子分布函数和电荷剥离 (He^{1+} 和 He^{2+} 的比例) 情况等重要信息, 并作为关键诊断来监测燃烧等离子体的性能^[20]. 国内的 HL-1M 装置发展了一套基于平行板探测器的 NPA, 用于测量等离子体的平均温度. HL-2A 装置沿用了平行板 NPA, 还开发了一套 11 通道的具有空间分辨能力的紧凑型 NPA (CP-NPA)^[21], 可以对平均离子温度分布和非热离子分布等进行测量. 除此之外, 还在 HL-2A 装置上发展了一套电流型固态 NPA (ssNPA) 对能量大于 22.5 keV 的快离子进行了测量.

近些年, 美国 Heidbrink 教授的 EP 物理研究团队^[22,23] 研发了一种基于闪烁体成像探测, 并可以放置在装置真空室内部的成像型 NPA (INPA), 用于测量快离子的能谱、空间分布和螺距角等关键信息. 相对于放置于装置真空室外, 并额外需要真空维持、电荷剥离和粒子分析和探测等复杂功能模块的传统 NPA, INPA 具有结构和原理简单、造价较低和实用性强等优势, 已在 NSTX, ASDEX-U^[24] 与 EAST^[25] 等装置上得到了广泛应用并取得了较好的实验结果.

在 HL-2A 装置上已经发展了一套 INPA 诊断系统^[26], 并在相关高能量粒子物理实验中取得了初步的实验结果. 本文第 1 部分 (引言) 简要介绍了 NPA 诊断系统及发展. 第 2 部分介绍 INPA 诊断系统的测量原理、物理设计和主要结构. 第 3 部分介绍 INPA 诊断系统在 HL-2A 装置上的安装布局 and 初步实验结果. 第 4 部分为总结.

2 INPA 诊断系统的物理设计

INPA 诊断系统固定于 HL-2A 装置的真空室弱场侧内壁, 其测量原理如图 1 所示. 由粒子入射孔和具有电荷剥离作用的碳微晶体膜片组成准直器, 与 NBI 电荷交换后从背景等离子体中逃逸出携带有快离子信息的大量中性粒子通过该准直系统, 并被碳微晶体膜片剥离电子重新变成带电离子 (D^+), 透射出剥离膜片的带电离子在装置边缘磁场中受洛伦兹力 ($\mathbf{f} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, 其中, e 为单电荷电量, \mathbf{B} 为装置边缘磁场强度) 作用偏转 180° 后打击到闪烁体上产生荧光. 粒子的能量越高, 则偏转半径 ($r_d = \sqrt{2Em_i}/(eB)$, 其中, m_i 表示 D^+ 的质量) 越大, 在闪烁体上轰击点与剥离膜片的纵向距离越大, 闪烁体上光斑的亮度反映了轰击到闪烁体上的粒子通量. 从 6 个准直测量通道透射出的粒子束及其入射轨迹分别用红色、蓝色、黄色、绿色、紫色和棕色曲线表示, 并分别被命名为第 1–6 通道.

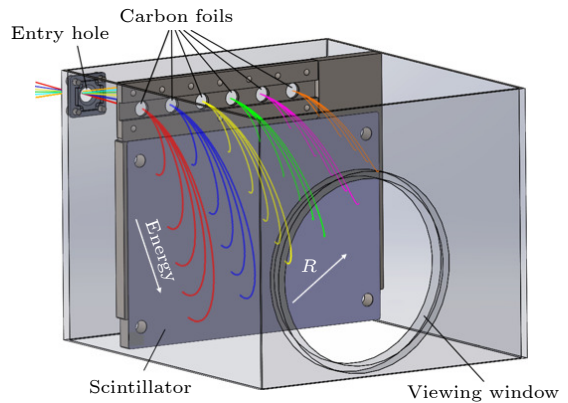


图 1 HL-2A 装置 INPA 诊断系统的主要结构及快离子的测量轨迹示意图

Fig. 1. Structure of the INPA and flight trajectories of FIs on HL-2A.

图 2 给出了包括了 $2^\#$ NBI 方向和 INPA 安装窗口在内的 HL-2A 装置部分俯视图. 在本次放电中, HL-2A 的等离子体电流 (I_p) 方向为逆时针, 纵向磁场 (B_t) 方向为顺时针. 图 2 中用两条粗黑色直线表示 $2^\#$ NBI 系统的左右两个注入分束, 而 INPA 系统 6 个测量通道通过准直系统测量到的中性粒子主要来自于 NBI 右注入分束. INPA 系统准直线在装置法兰中平面的理想情况下, 第 1–6 通道具体的测量位置见图 1 中红色、蓝色、黄色、绿色、紫色和棕色粗直线与 NBI 右注入分束的交

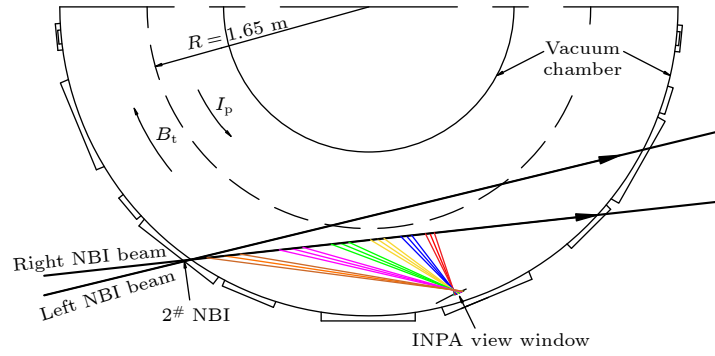


图 2 HL-2A 装置上 2# NBI 的注入路径和 INPA 诊断系统中 6 个测量通道所对应的观测位置

Fig. 2. Injection path of 2# NBI system and the observed positions for 6 channels of INPA on HL-2A.

表 1 INPA 诊断系统的 6 个测量通道所观测粒子的位置和粒子特征信息

Table 1. Observed positions and characteristic information of particles from the 6 channels of the INPA system.

测量通道(No.)	1	2	3	4	5	6
R/cm	172.6	170.6	170.9	175.8	180.5	211.8
Z/cm	-10.5	-10.5	-10.5	-10.5	-10.5	-10.5
$\theta/(\text{°})$	90.0	121.9	149.2	170.9	172.0	158.4
$v_{//}/v$	0	0.53	0.86	0.98	0.99	0.93

叉点. INPA 诊断系统 6 个观测位置的中心分别位于大半径 $R \approx 172.6, 170.6, 170.9, 175.8, 180.5$ 和 211.8 cm 处. 另外, 受到窗口位置和可操作空间等实际限制因素, INPA 系统安装在 HL-2A 装置的中平面下方, 粒子入射孔在装置中平面下方 $Z = -10.5 \text{ cm}$ 处.

计算通过 6 个测量通道进入准直系统的粒子速度方向与测量位置处磁场方向之间的夹角即可得到快离子的螺距角. 图 3 给出了 HL-2A 装置在第 38140 次放电 (第 3 节的展示放电) 实验中 $B_t = 1.3 \text{ T}$ 和 $I_p = (155 \pm 3) \text{ kA}$ 的实际情况下, 利用 EFIT 代码反演的装置磁场形数据, 计算得到了理想情况下快离子的产生位置和对应的螺距角信息, 其螺距角 $v_{//}/v \approx 0, 0.53, 0.86, 0.98,$

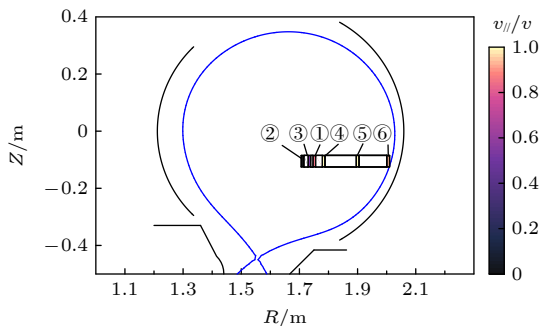


图 3 在 HL-2A 装置极向截面显示的 INPA 系统观测到的粒子位置和螺距角

Fig. 3. Positions and pitch angles of the observed particles from INPA system in the poloidal cross section in HL-2A.

0.99 和 0.93 , 即 $\theta \approx 90.0^\circ, 121.9^\circ, 149.2^\circ, 170.9^\circ, 172.0^\circ$ 和 158.4° ($v_{//}/v = \cos\theta$). 根据 HL-2A 装置和 INPA 系统安装位置的工程信息, 以及 38140 次放电的实验参数, 可以得知该 INPA 系统在理想情况下所测量粒子的位置范围和螺距角等信息, 如表 1 所列.

INPA 诊断系统原理图 (图 1) 对应的实物结构如图 4 所示. INPA 的外部结构为 304 不锈钢制成的长方形封闭腔体, 外部尺寸为 $10.6 \text{ cm} \times 12.0 \text{ cm} \times 9.5 \text{ cm}$, 其封闭结构可以屏蔽等离子体中的各种杂散光和杂质粒子等. 在 INPA 外部腔体上, 设有一个面向装置等离子体的直径 $\phi = 3 \text{ cm}$ 的粒子入射孔, 在 INPA 腔室内入射孔后方 3 cm 处则水平排布有 6 个间距为 1.2 cm 的电荷剥离膜片, 从观测孔望去从右向左将其编号为 1—6. 电荷剥离模块采用的是 10 nm 厚、 $\phi = 5 \text{ mm}$ 的圆形碳微晶体膜片. 为了增加该膜片的耐久性, 不仅将膜片固定在内/外径 $1.0/0.5 \text{ cm}$ 、厚 0.5 mm 的无氧铜环上, 而且其底部还固定在了每英寸 300 格的密铜网上, 如图 4(c) 所示. 碳微晶体膜片的厚度会使入射粒子的能量产生一定的能量衰减 (δE), δE 、入射粒子的能量 (E) 和膜片厚度 (d) 满足公式 $\delta E \approx 4.4 \times 10^{-2} d \sqrt{E}$, 其中 E 和 d 分别以 keV 和 nm 为单位. HL-2A 装置上 NBI 粒子的最高能量约为 42 keV , 因此当膜的厚度为 10 nm 时, 粒子经过剥离膜片后产生的最大能量衰减 $\delta E = 2.85 \text{ keV}$.

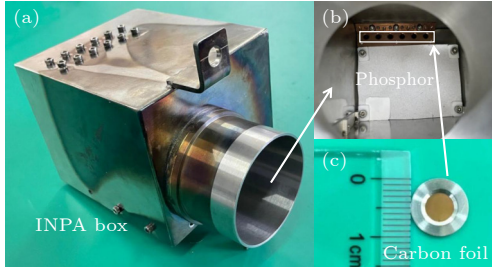


图4 HL-2A装置上INPA诊断系统主要部件的实物及内部布置图 (a) INPA的外观图; (b) 内部剥离膜片和闪烁体的布局图; (c) 碳微晶体膜片尺寸和结构

Fig. 4. External figure and arrangement inside the chamber of INPA diagnostics on HL-2A: (a) External figure; (b) arrangement of carbon microcrystal diaphragm and scintillator inside the chamber; (c) detail structure of carbon microcrystal diaphragm.

硫化锌掺杂银 (ZnS(Ag)) 闪烁体可以发射波长峰值为 450 nm 的蓝色可见光, 且发光效率约为葱晶体的 300%, 光衰减时间约为 200 ns, 能够在中性粒子通量较低时提高 INPA 的信噪比, 所以在 INPA 内部显示粒子轰击位置和通量等信息的闪烁屏采用了 ZnS(Ag) 闪烁体. 基于 HL-2A 装置的常规运行磁场强度和约 42 keV 的离子能量上限, ZnS(Ag) 闪烁体的尺寸为 7.0 cm × 10.0 cm.

由于直径为 $\phi = 5$ mm 的圆形碳微晶体膜片尺寸相对较大 (不能被看作理想的点), 因此能量相同、入射方向稍有不同粒子在入射并击打到荧光屏的过程中会存在如图 5(a) 所示的发散情况, 即在横向和纵向形成具有一定宽度的椭圆形轰击斑. 轰击斑的尺寸随入射粒子能量以及测量通道的变化如图 5(b) 所示, 并将椭圆型光斑在纵向的短轴长度对应的能量范围称作能量分辨率 ΔE . 6 个通道上粒子的落点与剥离膜片中心的距离 D ($D = 2r_d$) 和粒子入射能量的关系如图 5(c) 所示, 研究发现二者成指数相关. 对 2—42 keV 能量范围的粒子在 6 个通道中的能量分辨率计算结果如图 5(d) 所示. 在 HL-2A 的 INPA 系统内, 经第 1 测量通道对入射粒子能量分辨率最差, 在测量粒子能量为 42 keV 的情况下 $\Delta E \approx 4.5$ keV. 另外, 由于碳微晶体膜片和入射孔的实际尺寸会造成准直系统的观测位置偏离理想位置的展宽, 如图 2 中理想观测粗线两侧的细线所示. 由此造成的各通道所测量的最大半径 R_{\max} 、最小半径 R_{\min} 、以及立体张角 ϕ 见表 2 所列.

INPA 系统在真空室内的实际安装位置如图 6(b) 所示. 由于理想的中平面窗口已经被其他

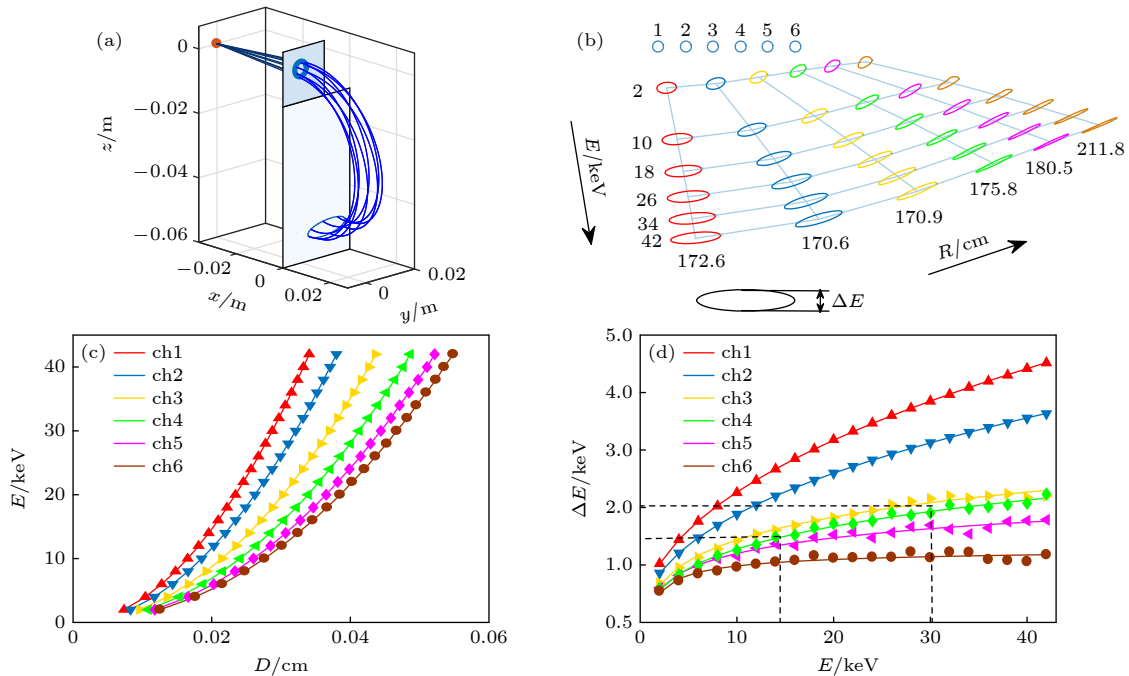


图5 INPA诊断系统中几何机构引起的误差分析 (a) 粒子束在磁场中的偏转及在闪烁体上的轰击斑; (b) INPA诊断系统6个测量通道的粒子在闪烁体上的落点; (c) 粒子在闪烁体上的落点位置和入射能量的关系; (d) 能量分辨率与粒子能量的关系

Fig. 5. Analysis of errors caused by geometric mechanisms of diagnostic systems: (a) Flight orbits and impact spots of the measured particles on scintillator; (b) positions of impact spots from the particles from 6 channels in INPA; (c) relationship between the position of the particle's landing point on the scintillator and the incident energy; (d) relationship between energy of particles and energy resolution.

表 2 INPA 诊断系统的 6 个通道对应的测量范围
 Table 2. Measurement ranges corresponding to the 6 channels of the INPA diagnostic system.

测量通道(No.)	1	2	3	4	5	6
R_{\min}/cm	172.1	170.4	170.6	174.3	185.5	201.5
R_{\max}/cm	173.2	170.9	171.5	177.8	194.1	219.1
$\phi/(\circ)$	1.25	1.00	0.59	0.33	0.19	0.11

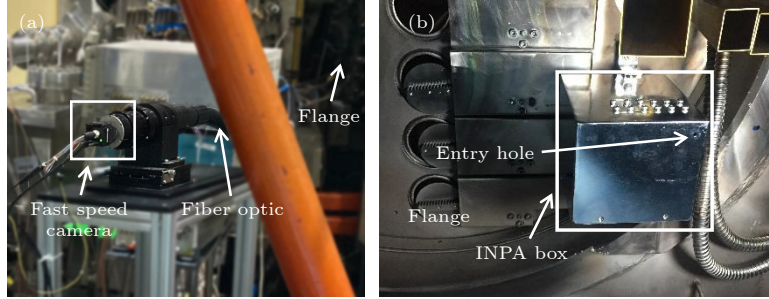


图 6 HL-2A 装置上 INPA 诊断系统的安装 (a) INPA 诊断系统在真空室内的安装位置; (b) INPA 诊断系统在真空室外的高速相机、光纤束和法兰等

Fig. 6. Installation of INPA system on HL-2A: (a) Installation of the INPA on the flange inside the vacuum chamber; (b) arrangement of the fast speed camera, light fiber bundle and flange.

诊断占用, INPA 所在直径为 63 cm 的法兰位于中平面下 15 cm 处. 经过安装和核实, 粒子入射孔位于中平面下 10.5 cm 处. 在真空室外, 通过成像光纤束将真空室内闪烁体上的轰击亮斑图像信息传输给高速相机, 如图 6(a) 所示. 实验中采用了量子效率峰值与 ZnS(Ag) 闪烁体发光波长峰值较为符合的工业高速相机 (LUMENERA Lt225) 记录闪烁体的发光信息, 其曝光时间范围和最大全画幅帧频可以在 26 μs —500 ms 和 170 fps 范围内根据实验情况 (如 NBI 束线强度、逃逸粒子的通量和闪烁体的发光强度等) 进行调节.

3 INPA 诊断系统的物理实验结果及分析

在 HL-2A 装置中有 NBI 加热提供中性粒子媒介的情况下, INPA 诊断系统被应用于快离子与高能量不稳定性之间的相互作用研究, 确定激发各种不稳定性快离子的特征. 在第 38140 次放电实验中, 在 INPA 诊断系统上得到了有效的实验数据, 并确定在这次放电实验中激发了长寿模 (LLM) 不稳定性快离子的能量、位置和螺距角等特征信息.

第 38140 次放电中主要的实验参数、等离子体运行状态和快离子激发的不稳定性等见图 7. 在这次放电中, 等离子体电流和纵向磁场强度分别为 $I_p =$

(155 \pm 3) kA 和 $B_t = 1.3$ T, 它们随时间的演化如图 7(a) 中红色和蓝色曲线所示. 1[#] NBI, 2[#] NBI 和 LHCD 功率分别为 $P_{\text{NBI}_1} = 0.42$ MW, $P_{\text{NBI}_2} = 0.38$ MW 和 $P_{\text{LHCD}} = 0.6$ MW, 2[#] NBI 注入粒子的能量 $E_b \approx 30$ —32 keV, 其加热时序如图 7(b) 所示. 在 NBI 加热期间的 850—1100 ms 和 1500—1750 ms 时间段内, 等离子体处于高约束运行模式 (H 模), D_α 辐射本底突然降低并且出现了边缘局域模 (ELM) 引起的周期性振荡; 而在 1100—1500 ms 期间, 等离子体处于低约束运行模式 (L 模), D_α 辐射本底相对较高, 如图 7(c) 所示. 由于等离子体在 H 模运行情况下的约束性能优于 L 模, 因此等离子体平均密度 (n_e) 从 L 模情况下的 $1.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 上升到 H 模情况下的 2.2×10^{19} — $2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 如图 7(a) 中绿色曲线所示. 在整个 NBI 加热的 800—1800 ms 期间可在米尔诺夫 (Mirnov) 磁探针信号上观测到由快离子激发的高能量不稳定性中常见的 LLM, LLM 在 Mirnov 磁探针信号上引起的明显磁扰动信号和其频率谱图分别如图 7(d) 和图 7(e) 所示, LLM 的频率 (f_{LLM}) 基本稳定在 10—12 kHz 之间, 并且在 L 模运行期间 LLM 引起的磁扰动基本处于较高幅度且饱和状态; 而在 H 模运行期间, LLM 会被周期性爆发的 ELM 影响而出现磁扰动幅度的明显减小甚至被致稳的状态, 表现在频率上则是被周期性地打断和消失.

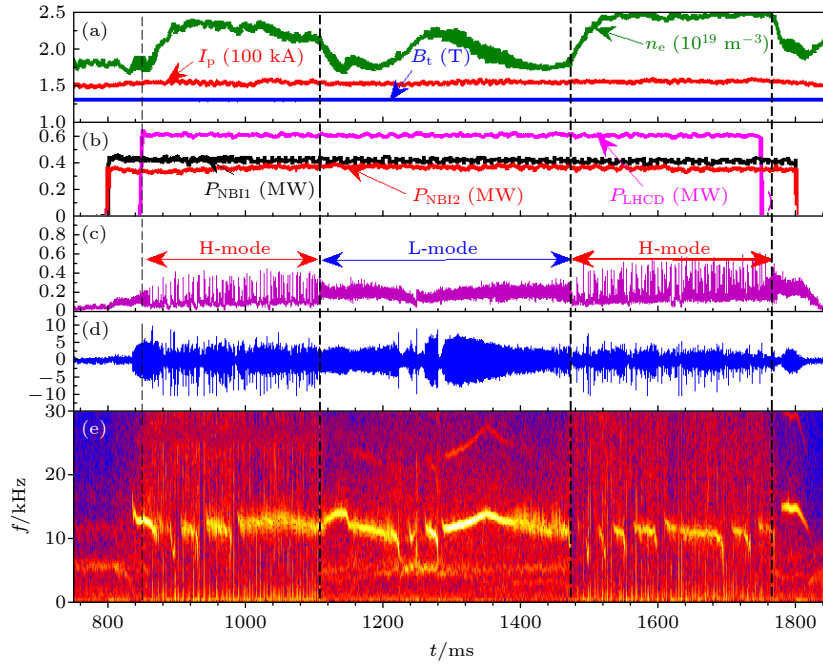


图 7 HL-2A 装置上第 38140 次放电的实验参数及观测到的 LLM 不稳定性 (a) 等离子体主要放电参数, 即 I_p 、等离子体平均密度 n_e 和 B_t ; (b) 1[#] 和 2[#] NBI 束线的加热功率和时序; (c) 氦 α (D_α) 辐射信号; (d) Mirnov 磁探针信号及 (e) 频率谱图

Fig. 7. Discharge parameters and the observed LLM instabilities in shot 38140 on HL-2A: (a) Main discharge parameters, I_p , line-averaged electron density n_e and B_t ; (b) heating power of 1[#] and 2[#] NBI systems and evolution; (c) D_α signal; (d) Mirnov signal and (e) its spectrogram.

通过调节快速相机记录了 NBI 加热期间与 LLM 引起的与快离子分布等相关的实验图像, 如图 8 所示. 图 8(a)—(l) 给出了快速相机记录的在 1096—1504 ms 期间内与 12 个时间点相对应的粒子轰击到闪烁体屏幕上的图像数据, 其中左上角位置的圆形亮点是等离子体放电发出的通过入射孔与第 1 个电荷剥离膜片直接被高速相机记录的可见光, 左上角蓝色圆点为第 3 个剥离膜片的实际位置. 在 LLM 扰动幅度相对较强且等离子体约束性能相对较差的 L 模运行期间, 在闪烁屏右侧观测到了与 LLM 相关的明显的粒子轰击斑, 如图 8(b)—(j) 所示. 而在 LLM 扰动幅度较弱的 H 模运行期间未在闪烁屏上观测到轰击斑, 如图 8(a) 和图 8(l) 所示. 在 L 模运行模式下与 LLM 不稳定性有关的快离子可以在 INPA 闪烁体上被明显地观测到的原因可能是: 1) H 模运行期间装置对等离子体整体的约束水平要远高于 L 模, 如 n_e 在 H 模运行期间高于 L 模, 装置对快离子的约束能力也相对较高; 2) 在 H 模运行期间的高 n_e 情况下, 逃逸的中性粒子与等离子体碰撞再次被电离的概率远高于 L 模运行低 n_e 情况; 3) LLM 不稳定性的强度 (Mirnov 磁探针的扰动幅度) 在 L 模运行模式

下要高于 H 模运行情况, 并且在 L 模运行期间 LLM 不会被频繁出现的 ELM 打断. 在这次实验中, 由于 2[#] NBI 的注入功率和束强度很低, 中性粒子束注入等离子体较浅, 能为快离子电荷交换逃逸提供的媒介中性粒子较少, 因此能打击到闪烁体上的粒子数目较少, 轰击斑光强较弱. 采用光纤束对闪烁体闪光图像进行传输的方案会使光通量损失约 30%. 根据闪烁体的粒子轰击闪光效果, 高速相机的曝光时间和采样时间分别被调整约为 30 ms 和 37 ms.

通过 EFIT 文件给出的第 38140 次放电过程中在 INPA 位置的具体磁场强度和分布情况可以计算出来自 INPA 诊断系统不同测量通道 (位置) 的粒子在闪烁屏上的落点网格, 即纵向和横向分别表示测量粒子的能量和位置. 图 9 给出了在 1356 ms 时刻高速相机记录到的闪烁体的粒子轰击斑图像 (对应于图 8(h)) 以及经过计算后得到的能量和位置网格. 通过对比发现, LLM 不稳定性被激发期间闪烁屏上的粒子轰击斑是由 INPA 诊断第 3 通道测量到的. 根据亮斑在水平方向的位置和纵向分布范围可知被测量粒子主要来自于大半径 $R = 170.9$ cm 处, 其能量范围和螺距角分别为

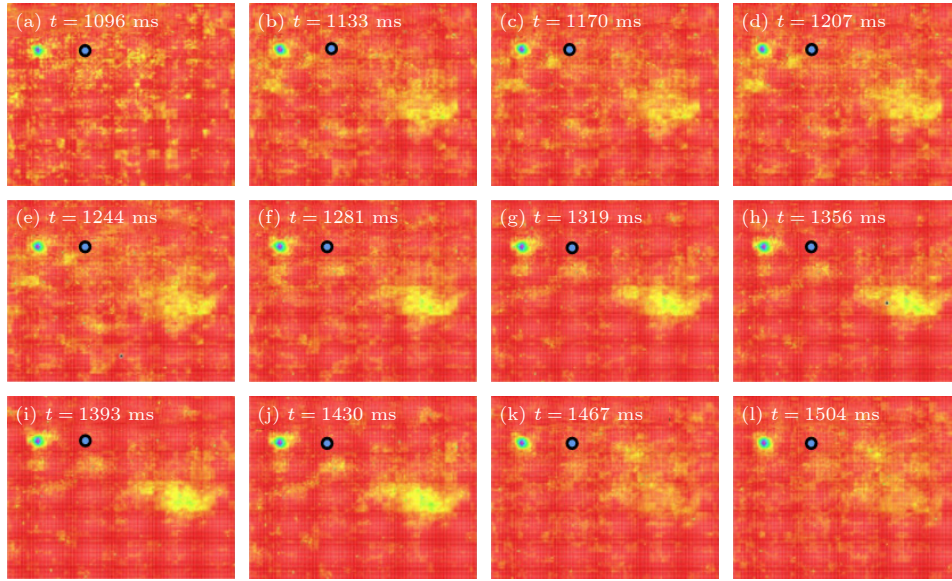


图 8 NBI期间的LLM引起的粒子轰击图像 (a)—(l) LLM在H模和L模运行期间的不同时刻在INPA闪烁体上观测到的粒子轰击图像及演化

Fig. 8. Impact spots caused by LLM instabilities on scintillator screen: (a)—(l) impact light spots of measured particles caused by LLM on scintillator screen in different time during H- and L-mode operation scenarios.

$E \approx 14\text{--}30\text{ keV}$ 和 149.2° ($v_{\parallel}/v \sim 0.86$). 因此, LLM 主要来自于等离子体芯部的通行快离子激发. 考虑到 INPA 诊断的系统误差问题 (图 5(d)), 激发 LLM 不稳定性的快离子的可能位置和能量范围分别为 $R \approx 170.6\text{--}171.5\text{ cm}$ 和 $E \approx 12.5\text{--}32.0\text{ keV}$.

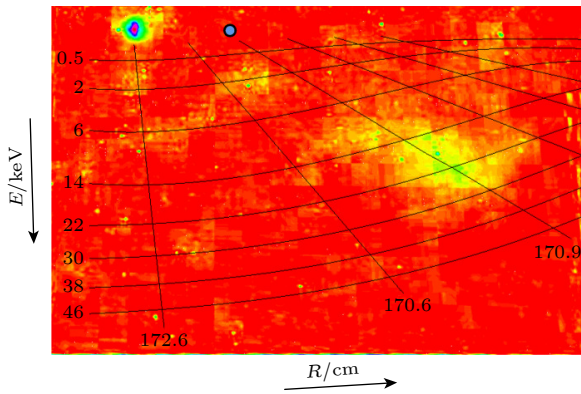


图 9 通过闪烁屏上的轰击斑位置得到的快离子能量和位置

Fig. 9. Energy and birthplace of FIs based on the impact light spot on scintillator screen.

LLM 又被称为“非共振鱼骨模”或“饱和鱼骨模”, 也是由快粒子与内扭曲模通过进动共振而激发. 与典型的鱼骨模相比, LLM 一般发生在安全因子 q 分布具有反剪切或弱剪切, 以及最小安全因子 q_{\min} 稍大于 1 的等离子体中 [27,28]. LLM 不仅可以引起 Mirnov 磁探针的扰动 (如图 7(d) 所示), 还可以

引起电子温度和等离子体密度等的扰动. 图 10(a)—(d) 给出了具有一定空间分辨率的远红外激光干涉仪诊断系统 (FIR₁—FIR₄) 分别在距离等离子体中心弦距 $d = 3.5, 10.5, 17.5$ 和 24.5 cm 处探测到的 LLM 不稳定性引起的密度扰动. LLM 在 $d = 10.5\text{ cm}$ 处引起的扰动最强, 在 $d = 3.5\text{ cm}$ 处较弱, 而在 $d = 17.5$ 和 24.5 cm 处 LLM 则不会引起密度扰动. 该现象说明 LLM 不稳定性大致局域在距离等离子体芯部 $r \approx 10.5\text{ cm}$ 处.

通过计算得到的 LLM 不稳定性的频率 (f_{Lab}) 与等离子体的环向旋转频率 (f_t) 以及激发 LLM 的快离子的进动频率 (f_p) 满足以下关系:

$$f_{\text{Lab}} = f_p + n f_t, \quad (1)$$

其中, n 表示不稳定性的环向模数, 对于属于内扭曲模的 LLM, 其环向模数为 1, 即 $f_{\text{Lab}} = f_p + f_t$.

粒子的进动频率公式 [29] 为

$$f_p = \frac{Eq}{2\pi e B_1 R_0 r} H(\kappa, s)(1 + 0(\varepsilon)), \quad (2)$$

其中, e 表示单电子电荷量; $\kappa = \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{2\varepsilon}} \cos \vartheta_0$, ϑ_0 为粒子螺距角; 磁剪切 $s = \frac{r}{q} \frac{dq}{dr}$; 反环径比 $\varepsilon = \frac{r}{R_0}$; $0(\varepsilon)$ 表示零阶小量, 一般可忽略.

通行粒子 ($\kappa^2 > 1$) 的进动公式中的 $H(\kappa, s)$ 因子可表示为

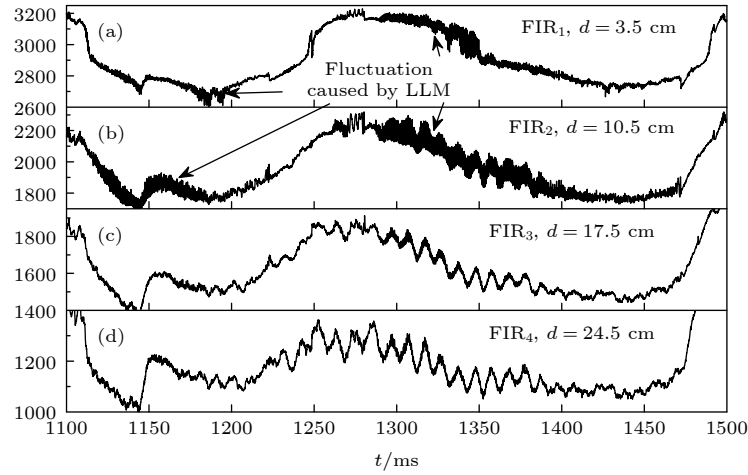


图 10 通过具有空间分辨率的远红外密度干涉仪的密度扰动确定 LLM 的局域位置

Fig. 10. Locations of LLM confirmed by the fluctuations in electron-density by far-infrared laser interferometer with a rough spatial resolution.

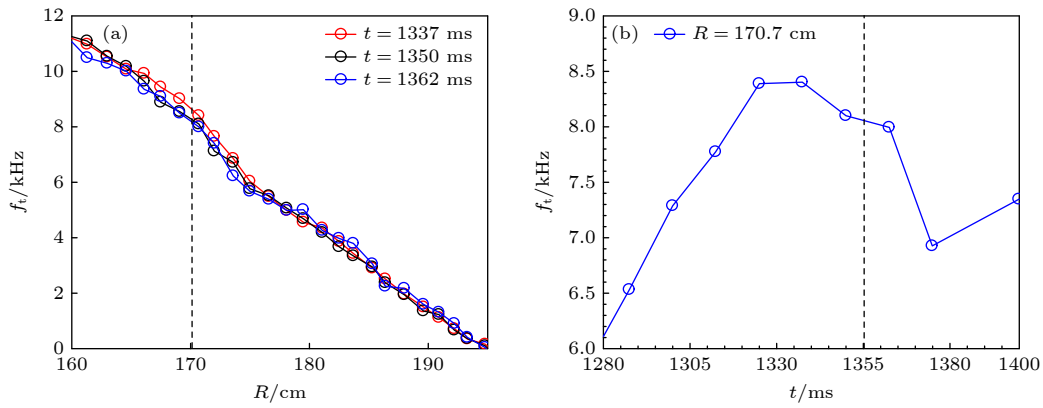


图 11 (a) 1356 ms 前后等离子体转动频率随大半径的变化; (b) 大半径在 170 cm 附近, 等离子体转动频率随时间的变化

Fig. 11. (a) Variations of plasma rotation frequency with R around 1356 ms; (b) variations of plasma rotation frequency with time for R around 170 cm.

$$H(\kappa, s) = 1 + 2\kappa^2 \left[\frac{E(1/\kappa^2)}{K(1/\kappa^2)} - 1 \right] + 4\kappa^2 s \left(\frac{E(1/\kappa^2)}{K(1/\kappa^2)} - \frac{\pi}{2K(1/\kappa^2)} \sqrt{1 - \frac{1}{\kappa^2}} \right). \quad (3)$$

这里 $E(1/\kappa^2)$ 和 $K(1/\kappa^2)$ 表示第一类和第二类不完全椭圆积分.

通过 INPA 诊断系统, 在实验中得到了激发 LLM 不稳定性的快离子能量范围、螺距角和位置分别为 $E = 12.5\text{--}32.0$ keV, $\theta \approx 149.2^\circ$ ($v_{//}/v \approx 0.86$) 和 $R = 170.6\text{--}171.5$ cm. 按照通行粒子的进动公式对 INPA 测量到的 $E \approx 12.5\text{--}32.0$ keV 快离子的进动频率进行计算, 取 LLM 不稳定性局域位置 $r \approx 10.5$ cm 处, $R_0 = 1.6$ m, $q \approx 1.05$, $s = 0.25E = 12.5\text{--}32$ keV 的通行离子的进动频率 $f_p \approx 2.4\text{--}6.2$ kHz. 另外, 通过电荷交换谱仪得到了在 NBI

注入期间等离子体的环向旋转频率信息, 如图 11 所示. 图 11(a) 给出了在 $t = 1350$ ms 附近 (接近实验分析的 $t = 1356$ ms 时刻) 等离子体的环向旋转频率的空间分布. 在 LLM 不稳定性局域位置处 $r \approx 10.5$ cm ($R = 170.9$ cm) 的等离子体环向旋转频率 $f_t \approx 8.1$ kHz, 如图中虚线所对应的位置. 图 11(b) 给出了在 LLM 不稳定性局域位置附近的等离子体环向旋转频率随时间的演化. f_t 的变化趋势与 LLM 频率变化大体一致, 因此, LLM 不稳定性频率的变化主要是由 f_t 的变化引起的.

将上述计算得到的能量 $E = 12.5\text{--}32.0$ keV 的通行离子的进动频率 ($f_p \approx 2.4\text{--}6.2$ kHz) 和实验得到的在 LLM 不稳定性局域位置等离子体环向旋转频率 ($f_t = 8.1$ kHz) 代入 (1) 式可得, f_{Lab} 范围在 $10.5\text{--}14.3$ kHz, 见表 3. 该结果与频谱图中

表 3 通行快离子的理论计算频率值与实验观测 LLM 不稳定性频率对比
Table 3. Comparisons between the calculated frequency of EIs and f_{LLM} .

E/keV	f_p/kHz	f_i/kHz	$f_{\text{Lab}} = f_p + f_i/\text{kHz}$	f_{LLM}/kHz
12.5	2.4	8.1	$2.4 + 8.1 = 10.5$	13.4
32	6.2	8.1	$6.2 + 8.1 = 14.3$	13.4

观测到在 $t = 1356$ ms 时刻的 LLM 不稳定性的频率 $f_{LLM} = 13.4$ kHz 接近. 因此, 在误差范围内可以证明实验中的 LLM 不稳定性是由能量 $E = 12.5\text{--}32.0$ keV、螺距角 $\theta \approx 149.2^\circ$ ($v_{\parallel}/v \approx 0.86$) 和局域位置在 $R = 170.6\text{--}171.5$ cm 处的通行快离子激发的.

4 总结与讨论

根据 HL-2A 装置的运行参数和实际空间位置等条件, 设计了一套 INPA 诊断系统用于高能粒子物理研究中快离子的空间分布、能量和螺距角等关键信息的测量, 以及高能粒子不稳定性与快离子相互作用的研究. 在 HL-2A 装置物理实验中, 使用 INPA 诊断系统对快离子进行了观测, 得到了 LLM 不稳定性主要由能量、螺距角和位置分别为 $E = 12.5\text{--}32.0$ keV, $\theta \approx 149.2^\circ$ ($v_{\parallel}/v \approx 0.86$) 和 $R = 170.1\text{--}171.5$ cm 处的芯部快离子激发, 并通过理论计算对该结果进行了验证. 由于 INPA 诊断系统的安装位置距离 NBI 束线较远, NBI 粒子束在注入到等离子体中所观测位置后的衰减比较严重, 所能提供给背景等离子体中快离子进行电荷交换的中性粒子很少. 另外, 采用对光传输效率较差的成像光纤束对闪烁屏上的光斑图像进行传输, 这些都造成了 INPA 系统的有效信号较弱. 目前, HL-2A 装置上的 INPA 系统主要适用于在 NBI 条件下, 对快粒子约束条件较差的 L 模运行模式的低密度等离子体进行测量. 在此条件下, INPA 诊断系统的时间分辨率约为 37 ms. 在下一轮的实验中将设计专门的图像传输光路提高 INPA 诊断系统的信噪比和时间分辨率. INPA 系统在 HL-2A 装置上的设计和实验为该诊断在 HL-2M 装置上的发展积累了重要的物理设计、工程安装和实验运行经验. 根据 HL-2M 装置高能粒子物理实验需求, INPA 诊断系统已经开始在 HL-2M 装置上进行设计和加工.

参考文献

- [1] Heidbrink W W 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2113
- [2] Chen L, Zonca F 2016 *Rev. Mod. Phys.* **88** 015008
- [3] Ding X T, Chen W 2018 *Plasma Sci. Technol.* **20** 094008
- [4] Shi P W, Chen W, Duan X R 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 035202
- [5] Chen W, Wang Z X 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 125001
- [6] Fasoli A, Gormenzano C, Berk H L, Breizman B, Briguglio S, Darrow D S, Gorelenkov N, Heidbrink W W, Jaun A, Konovalov S V 2007 *Nucl. Fusion* **47** S264
- [7] Afanasyev V I, Chernyshev F V, Kozlovsky S S, et al. 2022 *JINST* **17** C07001
- [8] Kocan M, Garcia-Munoz M, Ayllon-Guerola J, et al. 2017 *JINST* **12** C12027
- [9] Zhang J, Huang J, Chang J F, Wu C R, Heidbrink W W, Salewski M, Madsen B, Zhu Y B, von Hellermann M G, Gao W, Xu Z, Wan B 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 10D121
- [10] Saquilayan G M Q, Wada M 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 01AA01
- [11] Shang J, Huang Y, Yang K, Chen B W, Liu C H, Yang Y 2021 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **41** 333 (in Chinese) [高洁, 黄渊, 杨凯, 陈宝维, 刘春华, 杨屹 2021 *光谱学与光谱分析* **41** 333]
- [12] Berezovsky E L, Efremov S L, Izvozhnikov A B, Petrov, M P, Petrov S Y 1981 *10th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics* Moscow, Russian Republic, September 14–19, 1981 p67
- [13] Medlley S S, Donne A J H, Kaita R, Kislyakov A I, Petrov M P, Roquemore A L 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 011101
- [14] Medlley S S, Bell R E, Petrov M P, Roquemore A L, Suvorkin E V 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1896
- [15] Bracco G, Betello G, Mantovani S, Moleti A, Tilia B, Zanza V 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 5685
- [16] Karpushov A N, Duval B P, Schlatter C 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 033504
- [17] Chernyshev F V, Afanasyev V I, Dech A V, Kick M, Kislyakov A I, Kozlovskii S S, Kreter A, Mironov M I, Petrov M P, Petrov S Y 2004 *Instr. Exp. Tech.* **47** 214
- [18] Zhu Y B, Bortolon A, Heidbrink W W, Celle S L, Roquemore A L 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10D304
- [19] Afanasyev V I, Gondhalekar A, Babenko P Y, et al. 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2338
- [20] Stott P E, Gorini G, Prandoni P, Sindoni E 2012 *Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors 2* (New York: Springer)
- [21] Xia Z W, Li W, Yang Q W, Lu J, Yi P, Gao J M 2013 *Plasma Sci. Technol.* **15** 101
- [22] Du X D, Van Zeeland M A, Heidbrink W W, Su D 2018 *Nucl. Fusion* **58** 082006
- [23] Van Zeeland M A, Du X D, Heidbrink W W, Stagner L, Su D 2019 *JINST* **14** C09027
- [24] Rueda-Rueda J, Garcia-Munoz M, Viezzer E, Schneider P A, Garcia-Dominguez J, Ayllon-Guerola J, Galdon-Quiroga J, Herrmann A, Du X D, Van Zeeland M A, Oyola P,

- Rodriguez-Ramos M, ASDEX Upgrade team 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 043554
- [25] Liu Y, Xu M, Cai H S, et al. 2023 *The 8th Conference on Fusion Plasma Diagnostics Zhuhai China*, March 25–27, 2023 (in Chinese) [刘洋, 徐明, 蔡辉山, 等 2023 第八届等离子体诊断会议 中国珠海, 2023 年 5 月 25—27 日]
- [26] Yan X Y, He X F, Yu L M, et al. 2023 *The 8th Conference on Fusion Plasma Diagnostics Zhu Hai, China*, March 25–27, 2023 (in Chinese) [颜筱宇, 何小斐, 于利明, 等 2023 第八届等离子体诊断会议 中国珠海, 2023 年 5 月 25—27 日]
- [27] Zhang R B, Wang X Q, Xiao C J, Wang X G, Liu Y, Deng W, Chen W, Ding X T, Duan X R, HL-2A Team 2014 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **56** 095007
- [28] Wang X Q, Zhang R B, Qin L, Wang X G 2014 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **56** 095013
- [29] Peeters A 1994 *Ph. D. Dissertation* (Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven)

SPECIAL TOPIC—Energetic particles in magnetic confinement fusion plasma

Physical design and primary experimental results of imaging neutral particle analyzer on HL-2A tokamak^{*}

Yan Xiao-Yu¹⁾²⁾ He Xiao-Fei²⁾ Yu Li-Ming^{2)†} Liu Liang²⁾ Chen Wei²⁾
 Shi Zhong-Bing²⁾ Lu Jie²⁾ Wei Hui-Ling²⁾ Han Ji-Feng¹⁾
 Zhang Yi-Po²⁾ Zhong Wu-Lü²⁾ Xu Min²⁾

1) (*Key Laboratory of Radiation Physics and Technology of the Ministry of Education, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

2) (*Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China*)

(Received 11 May 2023; revised manuscript received 25 July 2023)

Abstract

The imaging neutral particle analyzer (INPA) based on scintillator (ZnS(Ag)) is designed and used on HL-2A tokamak to investigate the distribution of energetic particles (EPs) and even their interactions with magnetohydrodynamic instabilities. The collimation system is composed of a pinhole of 3 mm in diameter and six circular carbon microcrystal diaphragms each with a thickness of 10 nm. The neutral particles escape from six definite positions in the neutral beam injection path and pass through the collimator system at a certain pitch angle, and the neutral particles become fast ions after passing through the carbon microcrystal diaphragm. The fast ions will hit the scintillator after a 180° deflection by the edge magnetic field. The energy, pitch angle and birthplace can be calculated by the position and light intensity of the impact spots. The images of impact spots caused by long-lived mode are recorded by a high-speed camera through the fiber optic bundle. The long-lived mode instabilities approve to be excited by the core EPs with energy value in a range of $E \sim 12.5\text{--}32$ keV, pitch angle of $v_{\parallel}/v \sim 0.86$, and the birthplace in a range of $R \sim 170.5\text{--}171.5$ cm.

Keywords: fast ions, imaging neutral particle analyzer, long-lived mode instability

PACS: 52.55.Fa, 52.55.Pi, 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.72.20230768

^{*} Project supported by the the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2019YFE03020000, 2018YFE0304100), the Science and Technology Program of Sichuan Province, China (Grant Nos. 2022NSFSC1823, 2022ZYD0019), and the Innovation Program of SWIP, China (Grant No. 202103XWCXRC003).

[†] Corresponding author. E-mail: yulm@swip.ac.cn

HL-2A装置上成像型中性粒子分析器的物理设计和初步实验结果

颜筱宇 何小斐 于利明 刘亮 陈伟 石中兵 卢杰 魏会领 韩纪锋 张轶波 钟武律 许敏

Physical design and primary experimental results of imaging neutral particle analyzer on HL-2A tokamak

Yan Xiao-Yu He Xiao-Fei Yu Li-Ming Liu Liang Chen Wei Shi Zhong-Bing Lu Jie Wei Hui-Ling
Han Ji-Feng Zhang Yi-Po Zhong Wu-Lü Xu Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 215212 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230768

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230768>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

正三角型三芯光纤中等腰对称平面波的调制不稳定性分析

Modulation instabilities in equilateral three-core optical fibers for isosceles-triangle symmetric continuous waves

物理学报. 2018, 67(5): 054203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171650>

预测HL-2A托卡马克台基结构的MHD稳定性数值研究

Numerical study on predicting MHD stability of HL-2A tokamak pedestal structure

物理学报. 2022, 71(22): 225201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221098>

经典瑞利-泰勒不稳定性界面变形演化的改进型薄层模型

Improved thin layer model of classical Rayleigh-Taylor instability for the deformation of interface

物理学报. 2018, 67(9): 094701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172613>

HL-2A上NBI加热H模实验的集成模拟分析

Transport analysis of NBI heating H-mode experiment on HL-2 A with integrated modeling

物理学报. 2022, 71(7): 075201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211941>

双锥对撞点火机制2020年冬季实验中的瑞利-泰勒不稳定性分析

Analytical studies of Rayleigh-Taylor instability growth of double-cone ignition scheme in 2020 winter experimental campaign

物理学报. 2022, 71(3): 035204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211172>

界面动力学参数对深胞晶界面形态整体波动不稳定性影响

Influence of interface kinetics parameters on the overall fluctuation instability of the interface morphology of deep cell crystal

物理学报. 2022, 71(16): 168101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220322>