

2019 年物理学会秋季会议

E 等离子体分会场
会议报告摘要

分会召集人：高喆、庄革、王晓钢、
万宝年、刘杰、王正涵

分会联系人：夏梦姣

激光等离子体离子加速关键物理问题研究

万阳^{1,2}、华剑飞¹、白植豪¹、鲁巍¹

¹清华大学工程物理系, 北京 100086

²Weizmann Institute of Science, Rehovot 7610001

Email: yang.wan@weizmann.ac.il

摘要: 近十余年来, 随着超短超强激光技术的迅速发展, 激光驱动离子加速研究已经逐渐发展为国际上非常活跃的前沿领域。因其超出传统加速技术四个量级的超高加速梯度以及超短、小尺寸、高流强等优异特性, 此类加速器在高时空分辨科学成像以及小型化肿瘤离子放疗等领域有着诱人的应用前景。

对于激光离子加速领域而言, 如何稳定地获得具有足够电荷量的高品质离子束一直是当前研究的关键挑战。在已知的诸多加速方案中, 光压加速 (RPA) 因其一维模型上高效率、准单能等优点, 自提出以来受到广泛关注。但由于 RPA 在多维物理中存在横向不稳定性、电子加热等一系列关键制约, 实验上进展一直不太理想。我们以 RPA 为切入点, 系统全面地分析了该模型的优势和缺陷, 其中针对横向不稳定性这一多年来困扰 RPA 的关键难题, 我们提出了全新的理论模型, 清晰解释了不稳定性的起源, 并得到了大范围内与模拟结果高度吻合的理论预测。在此基础上, 我们提出了包括双色光镊加速等三种新型的准单能离子加速方案。相较于已有的加速机制, 这三种方案具有更好的能量定标率, 有望通过百太瓦级的激光系统稳定地获得高品质的 100s MeV 离子源。

关键词: 激光离子加速; 光压加速; 横向不稳定性; 新型离子加速方案

强激光与纳米薄靶相互作用驱动的离子加速研究

沈晓飞、乔宾

北京大学应用物理与技术研究中心, 北京 100871

Email: xfshen@pku.edu.cn

摘要: 激光驱动离子加速在过去近二十年间引起了广泛的重视和研究, 这是由于其在医学治疗、质子照相、离子快点火等领域有着极其诱人的应用前景。目前, 实验上已经可以获得截止能量约为 100MeV 的离子束, 但一方面该能量仍然相对较低; 另一方面离子束又有能谱宽、角散大等缺陷, 这严重限制了激光驱动离子加速在实际中的应用。因此, 研究如何获得高品质离子束具有重要的意义。目前理论和实验上研究最多、最成熟的加速机制发生在激光与固体靶相互作用中, 尤其是靶背垂直鞘场加速和辐射压加速。其中前者对实验条件要求低、易于实现, 但其离子束品质较差、加速效率和能量转化效率较低; 而后者虽然理论上可以获得能量很高且能散较小的离子束, 但对实验条件要求较为苛刻, 且在多维条件下, 往往会由于不稳定性的发生, 导致加速提前终止, 加速效率和离子束品质均严重下降。基于此, 本文工作采用理论和数值模拟研究方法对强激光与纳米薄靶相互作用中的离子加速机制进行了深入研究, 着重于对动态电离物理在强激光驱动离子加速过程中的影响、稳定辐射压加速的新方法、辐射压加速机制中的离子能量定标率以及新型离子加速机制等进行探讨, 提出了两种稳定离子辐射压加速的新方案: 动态电离致稳和级联电子补充, 研究了数周期激光脉冲与超薄固体靶相互作用中的新型离子加速机制——类电容器离子加速, 并且深入探索了激光与纳米薄靶相互作用过程中离子能量的定标率问题。

关键词: 强激光等离子体相互作用, 激光驱动离子加速, 辐射压加速, 电离物理, 定标率

资助项目: 挑战计划 (TZ2018005), 国家自然科学基金 (11575298, 91230205, 11575031, 11175026), 国家基础研究 973 计划 (2013CBA01500, 2013CB834100), 国家高技术 863 计划, 国家青年千人计划

参考文献

- 【1】 X. F. Shen *et al.*, Achieving stable radiation pressure acceleration of heavy ions via successive electron replenishment from ionization of a high-Z material coating, *Phys. Rev. Lett.* 118, 204802 (2017)
- 【2】 X. F. Shen *et al.*, Maintaining stable radiation pressure acceleration of ion beams via cascaded electron replenishment, *New J. Phys.* 19, 033034 (2017)
- 【3】 X. F. Shen *et al.*, Electrostatic Capacitance-type Acceleration of Ions with an Intense Few-Cycle Laser Pulse, *Appl. Phys. Lett.* 114, 144102 (2019)
- 【4】 B. Qiao*, X. F. Shen, *et al.*, Revisit on ion acceleration mechanisms in solid targets driven by intense laser pulses, *Plasma Phys. Control. Fusion* 61, 014039 (2019)
- 【5】 X. F. Shen *et al.*, Scaling Laws of Ion Acceleration in Ultrathin Foils Driven by Laser Radiation Pressure", (2018), arXiv:physics.plasm-ph/1809.06007

托卡马克装置上撕裂模与湍流相互作用的研究

蒋敏¹、许宇鸿²、石中兵¹、钟武律¹、陈伟¹、李继全¹、HL-2A 组¹

¹核工业西南物理研究院, 成都 610225

²西南交通大学, 成都 610031

Email: jiangm@swip.ac.cn

摘要: 磁约束等离子体理论和模拟均表明撕裂模(磁岛)可以通过改变等离子体平衡参数的分布来改变湍流的水平及湍动输运。迄今为止,有关撕裂模与湍流相互作用的物理机制并不完全清楚。因此,深入研究等离子体中不同尺度的不稳定性模式(包括撕裂模、等离子体流和湍流)之间的相互作用有助于理解撕裂模物理及其对等离子体输运的影响,这对未来在大型聚变装置(例如 ITER 和 CFETR)上发展有效控制撕裂模的手段和维持等离子体的高约束性能具有极其重要的意义。

作者在 HL-2A 装置上研制了一套二维电子回旋辐射成像诊断,并利用该诊断及其它微波诊断系统地测量和研究了托卡马克中旋转和静态的宏观撕裂模与微湍流之间相互作用的时空演化过程及相关物理机制,取得了一系列创新性研究成果,包括:(一)实验上观测到旋转的 2/1 磁岛和 1/1 磁岛均能调节局域的流剪切和湍流水平,这为多尺度的非线性回旋动力学模拟提供了直接的实验证据;(二)从实验和模拟两个方面证实了磁岛区域的湍流由捕获电子模主导,旋转磁岛对湍流的调制主要是由于电子温度(压强)梯度的变化而引起的,并存在一个磁岛宽度阈值;(三)首次观测到磁约束等离子体中横越磁岛区域的湍流非线性扩散效应;(四)实验观测到磁岛对等离子体芯部准相关模的调制效应和准相关模的长程相关特征;(五)首次观测到共振磁扰动引起等离子体湍流的非线性耦合增强效应,该结果表明可以通过适当控制外加扰动场的幅度来改变静电湍流的非线性相互作用,进而调节湍动输运的水平。

关键词: 撕裂模, 等离子体流, 湍流, 湍动输运, 准相关模, 共振磁扰动

参考文献:

- 【1】M. Jiang, Z. B. Shi, Y. L. Zhu, "Optimization of the optical system for electron cyclotron emission imaging diagnostics on the HL-2A tokamak", *Plasma Sci. Technol.* 2017, 19, 084001 (2017).
- 【2】M. Jiang, W. L. Zhong, Y. Xu, et al., "Influence of $m/n = 2/1$ magnetic islands on perpendicular flows and turbulence in HL-2A Ohmic plasmas", *Nucl. Fusion* 58, 026002 (2018).
- 【3】M. Jiang, Y. Xu, W. Chen, et al., "Localized modulation of turbulence by $m/n=1/1$ magnetic islands in the HL-2A tokamak", *Nucl. Fusion* 59, 066019 (2019).
- 【4】M. Jiang, Y. Xu, W. L. Zhong, et al., "Influence of resonant magnetic perturbations and induced islands on plasma rotations and turbulence properties in the J-TEXT tokamak", *Nucl. Fusion* 59, 046003 (2019).
- 【5】M. Jiang, Y. Xu, W. L. Zhong, et al., "Modulation of quasi-coherent modes by $m/n=2/1$ tearing mode in the core of HL-2A plasmas", *Nucl. Fusion*, to be submitted (2019).

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11705051)

托卡马克等离子体对外加共振磁扰动响应的研究

王能超

华中科技大学, 电气与电子工程学院, 磁约束聚变与等离子体国际合作联合实验室,
武汉 430074

Email: wangnc@hust.edu.cn

摘要: 边界局域模 (ELM) 控制是 ITER 及未来磁约束聚变堆安全运行必须解决的一个关键问题。大量实验研究已经证实外加磁扰动能可靠地控制 ELM。相比于外加高环向模数 (n) 磁扰动, 低 n 磁扰动可以由布置于托卡马克真空室外的鞍形线圈产生, 在安装、运行与维护等方面比内部线圈更加方便、可靠, 更适合应用于聚变堆。但是, 将低 n 磁扰动用于控制 ELM 时, 其低极向模数 (m) 的共振分量对于芯部磁流体不稳定性的影响较大, 可能在芯部形成锁模磁岛, 降低等离子体约束性能甚至导致大破裂。研究等离子体对低 n 磁扰动的响应, 对于利用低 n 磁扰动可靠控制 ELM, 避免其对芯部磁流体不稳定性的不利影响, 补偿误差场等多个方面都具有重要的意义。

本报告将介绍在 J-TEXT 和 ASDEX Upgrade 托卡马克上开展的实验研究, 阐述托卡马克等离子体对外加低 n 共振磁扰动 (RMP) 响应的新机制: (1) 发现 RMP 穿透激发锁模的阈值与密度的 0.5 次方成正比, 该定标关系随后在 EAST 和 KSTAR 等装置上也获得证实; (2) 发现了等离子体对 RMP 的驻波型响应, 并结合实验与理论, 证实了驻波型响应是由高频转动 RMP 驱动锁模相位受迫振荡而激发的, 这对解锁锁模、避免锁模破裂具有极为重要的作用; (3) 发现边界局域模崩塌激发的模结构可以被外加 RMP 锁住, 这种新发现的“锁模”现象表明 ELM 崩塌过程中磁重联扮演着重要角色, 这对于理解 ELM 演化机制及其控制具有重要意义, 也为理解各类广泛存在的快速崩塌现象 (如太阳耀斑、锯齿崩塌) 提供参考。上述机制对理解外加 RMP 控制撕裂模及边界局域模 (ELM) 具有重要意义。

关键词: 托卡马克 共振磁扰动 等离子体响应 受迫磁重联 边界局域模

参考文献

- 【1】 N. Wang *et al.*, Study of the penetration of resonant magnetic perturbations in J-TEXT, *Nucl. Fusion* 2014, 54(6), 064014
- 【2】 N. Wang *et al.*, Plasma response to rotating RMPs with a locked mode in the J-TEXT tokamak, *Nucl. Fusion* 2019, 59(2), 026010
- 【3】 N. Wang *et al.*, Impact of $n = 1$ field on the non-axisymmetric magnetic perturbations associated with the ELM crashes in the ASDEX Upgrade tokamak, *Nucl. Fusion* 2019, 59(5), 054002

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0301100)、国家磁约束核聚变能发展研究专项(2018YFE0309100、2014GB118000)

强场激光物理理论与实验研究最新进展

沈百飞
中科院上海光机所
上海师范大学

报告介绍研究小组在强场激光物理理论和实验研究方面的最新进展。主要包括：1) 相对论涡旋激光物理，研究小组开拓了相对论涡旋激光物理这一新领域，提出了高角动量密度这一新物理概念，研究了相对论涡旋激光的高次谐波，发现相对论涡旋激光在固体界面的反射不严格遵守光学反射定律。2) 研究强场激光的 QED 效应（辐射反作用），表明激光足够强时，将产生极强的伽马辐射，同时辐射反作用将极大影响激光等离子体相互作用过程，也提出产生 20KeV 量级高亮度 X 光源的一种新方案。3) 介绍小组在实验方面的最新进展，包括激光驱动质子加速及质子成像、准单能氦离子加速、正电子产生、伽马射线产生等。

E006

专题代号: E

清华大学超强激光与激光加速研究进展

鲁巍

清华大学工程物理系, 北京 100084

Email: weilu@tsinghua.edu.cn

摘要:

清华大学激光等离子体物理与先进加速器技术研究团队成立于 2011 年, 致力于发展基于激光等离子体物理的新一代加速器技术及其应用。本报告将简单介绍团队近九年来在激光等离子体加速及超强激光技术研究方面的一些代表性成果。在高品质尾波加速方面, 我们系统发展了尾波加速注入与理想级联的相空间动力学和超高亮度低能散束流产生系列理论方案, 并在实验中首次实现了尾波场结构与演化的超快电子探针快照, 以及从传统加速器系统到激光尾波加速器的高效率级联; 在激光离子加速方面, 我们发展理论系统解释了光压加速横向不稳定性的起源问题, 并提出了一系列稳定离子加速的新方案; 在新型超短超强激光技术方面, 我们发展了基于特殊等离子体结构的“光子减速器”方案, 首次获得了 4-20 微米波长的近单周期相对论光强中红外激光脉冲。此外, 我们还通过激光体系结构与工程化两方面的创新, 发展了新一代的超紧凑型工业级超短超强激光器, 为激光加速相关应用的落地奠定了重要基础。

关键词: 激光等离子体物理 激光等离子体加速器 超短超强激光

基金项目: 国家自然科学基金 11425521(杰青)、11535006(重点)、973A 类项目等。

Grassy ELM 结合辐射偏滤器反馈控制——聚变堆边界集成解决方案

徐国盛*, 万宝年, 杨清泉, 袁旗平, 李克栋, 颜宁, 王一丰, 王亮, 段艳敏

中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031

*Email: gsxu@ipp.ac.cn

摘要: 大幅度边界局域模 (ELM) 造成的瞬态热负荷是聚变堆实现稳态运行的主要挑战, 在金属壁条件下尤为严峻。Grassy ELM 是高功率加热下自发的高频小幅度边界局域模 (ELM)。具有 Grassy ELM 的托卡马克高约束运行模式 (H 模) 适用于聚变堆台基低碰撞率条件; 其较高的边界安全因子降低了等离子体发生大破裂的风险; 其较强的杂质排出能力特别适合实现高性能等离子体的稳态运行, 是中国聚变工程试验堆 (CFETR) 等未来强磁场稳态聚变堆替代大幅度 ELM 的候选运行模式。EAST 在与未来聚变堆类似的金属壁、低旋转、电子主导加热等物理条件下, 稳定重复地实现了 Grassy ELM 高性能稳态运行, 在此基础上首次揭示了 Grassy ELM 形成的机理[1], 发现较低的边界密度梯度和较宽的边界台基是其形成的关键因素, 并系统验证了其于辐射偏滤器、高密度、高自举电流份额、完全非感应电流驱动等未来稳态聚变堆特需运行条件的兼容性。进一步, EAST 成功实现了一种结合偏滤器靶板探针和辐射信号的辐射偏滤器反馈控制新方法, 与 Grassy ELM 相结合, 发展出了一种高性能稳态等离子体运行模式, 在维持等离子体高约束性能不下降的前提下, 实现了偏滤器靶板电子温度 T_{et} 稳定控制在 5-8eV, 如图 1 所示。这一运行模式为解决聚变堆热负荷问题, 实现聚变堆的高性能稳态运行提供了一种非常有希望的新方案。其等离子体部分归一化参数与 CFETR 的设计参数接近, 有望在 CFETR 上得到应用。

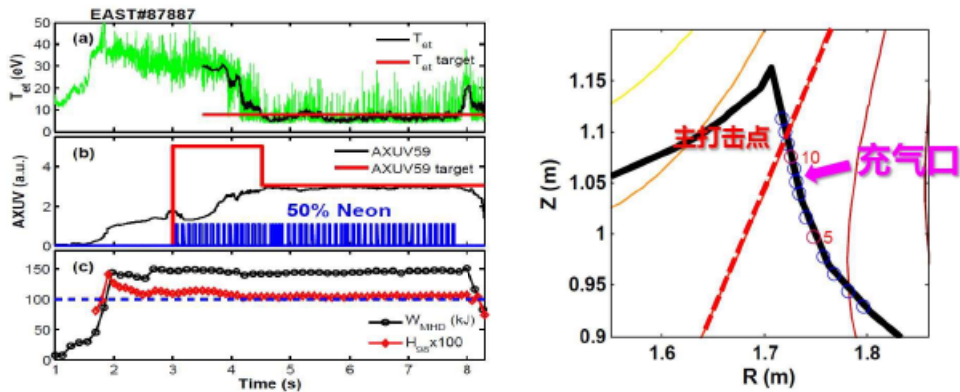


图 1 EAST 实现辐射偏滤器脉冲反馈控制 (50%氖气), (a)靶板打击点附近电子温度 T_{et} 控制在 5-8eV, (b)偏滤器辐射控制在设定值附近, (c)没有储能下降。Grassy ELMs 较强的杂质排出能力至关重要。

关键词: 托卡马克, EAST, CFETR, Grassy ELM, 辐射偏滤器反馈控制, H 模, 热负荷, 稳态运行
参考文献

[1] G. S. Xu *et al.*, Promising High-Confinement Regime for Steady-State Fusion, *PRL* 2019, 122 (25), 255001.

基金项目: ITER 专项 (NO. 2015GB101002), 国家自然科学基金项目 (NO. 11575235) 等

中国环流器二号 A 装置上基于射频波和杂质主动注入的边缘局域模缓解研究

钟武律¹、邹晓岚²、肖国梁¹、梁桢树^{1,2}、张轶波¹、冯北滨¹、陈程远¹、白兴宇¹、宋绍栋¹、高金明¹、刘春华¹、杨曾辰¹、蒋敏¹、施培万¹、L. Delpech², A. Ekedahl², G. Giruzzi², T. Hoang², D. Mazon², Y. Peysson²、董春风¹、孙平¹、刘亮¹、王正涵³、韩明昆³、肖维文⁴、刘阿娣⁵、严龙文¹、卢波¹、余德良¹、石中兵¹、刘仪¹、杨青巍¹、许敏¹、段旭如¹、刘永¹、HL-2A 团队¹

¹核工业西南物理研究院, 成都, 610041

²法国原子能委员会聚变研究所, 卡达拉奇, F-13108

³大连理工大学物理学院, 大连, 116024

⁴浙江大学聚变理论与模拟中心, 杭州, 310027

⁵中国科学技术大学近代物理系, 合肥, 230026

Email: zhongwl@swip.ac.cn

摘要: 在磁约束聚变装置典型的高约束模 (H 模) 等离子体放电条件下, 阵发性的边缘局域模 (ELM) 爆发将向等离子体边界以外喷发大量粒子和能量, 使得面向等离子体第一壁上的热沉积有可能超过材料的热负荷极限, 为了避免大幅度的 ELM 对聚变装置造成损害, 需要发展有效缓解和控制 ELM 的技术方法。中国环流器二号 A (HL-2A) 托卡马克近期重点开展了基于射频波和杂质主动注入的 ELM 缓解研究: 利用基于 PAM 天线的低杂波电流驱动 (LHCD) 实现了对 ELM 的缓解, 研究表明 ELM 缓解与台基湍流增强密切相关¹, 观察到 LHCD 引起的极向速度剪切降低改变了湍流径向波数谱并增强了湍流强度, 实验和理论模拟结果一致地揭示了径向波数谱移动对湍流强度的调节作用²。此外, 利用电子回旋共振加热 (ECRH) 开展了对 ELM 的控制研究, 观察到 ELM 的行为与 ECRH 沉积位置和功率密切相关; 在杂质主动注入缓解 ELM 研究方面, HL-2A 通过利用激光吹气系统注入不同类型的重杂质粒子实现了对 ELM 的缓解和抑制, 实验表明缓解效果与注入杂质量密切相关³; 此外 HL-2A 上首次提出了利用掺杂的超声分子束 (SMB) 向 H 模等离子体中注入燃料 (氘气) 和杂质混合气体 (如氖气、氩气等), 并成功实现了对 ELM 的缓解⁴, 实验表明 ELM 行为的改变与杂质气体比例密切相关, 如 30% 的掺氖杂质 SMBI 能有效地缓解 ELM, 使得靶板峰值热通量降低为缓解前的 10%, 平均热通量降低为缓解前的 60%, 并且无杂质聚芯, 掺杂 SMBI 技术有可能实现既保持等离子体高约束状态又维持靶板低热通量。

关键词: 托卡马克, 高约束模, 边缘局域模缓解

参考文献

- 【1】 G.L. Xiao *et al.*, Effect of lower hybrid current drive on pedestal instabilities in the HL-2A tokamak, *Phys. Plasmas* 2017, 24, 122507
- 【2】 G.L. Xiao *et al.*, Effect of the externally driven velocity shear on the turbulence radial wavenumber spectral shift and its amplitude, *Phys. Plasmas* 2019, 26, 072303.
- 【3】 Y.P. Zhang *et al.*, Control of edge localized modes by pedestal deposited impurity in the HL-2A tokamak, *Nucl. Fusion* 2018, 58,046018
- 【4】 W.L. Zhong *et al.*, Impact of impurity mixture gas seeded by supersonic molecular beam injection on edge-localized modes in the HL-2A tokamak, *Nucl. Fusion* 2019, 59, 076033

基金项目：国家重点研发计划磁约束核聚变能发展研究专项(NO. 2017YFE0301106)，国家自然科学基金项目(NO. 11775070)，四川省科技计划项目 (2018JY0054)

J-TEXT 实验研究进展

扬州军¹, 陈忠勇¹, 陈志鹏¹, 夏东辉¹, 梁云峰^{1,2,3}, 王能超¹, 丁永华¹, 胡启明⁴, 程芝峰¹, 王璐¹, 江中和¹, 饶波¹, 黄卓¹, 李由¹, 严伟¹, 李达¹, 刘海⁵, 曾龙³, 黄缘¹, 林志芳¹, 郑玮¹, 刘海⁵, 赵开君⁶, 蒋敏⁷, 石跃江⁸, 高丽¹, 王之江¹, 张明¹, 于克训¹, 胡希伟¹, 虞清泉⁹, 庄革^{1,10}, K W Gentle¹¹, 潘垣¹ and the J-TEXT team¹

¹ 华中科技大学, 电气与电子工程学院, 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 磁约束聚变与等离子体教育部国际联合实验室, 武汉

² Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung—Plasmaphysik, 52425 Jülich, Germany

³ 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥

⁴ Princeton Plasma Physics Laboratory, PO Box 451, Princeton, NJ 08543, United States of America

⁵ 西南交通大学, 成都

⁶ 东华理工大学, 南昌

⁷ 核工业西南物理研究院, 成都

⁸ Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

⁹ Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, D-85748 Garching, Germany

¹⁰ 中国科学技术大学, 合肥

¹¹ Institute of Fusion Studies, University of Texas, Austin, TX 78712, United States of America

J-TEXT 托卡马克装置是运行于华中科技大学的一个中型实验装置, 目前其主要研究围绕托卡马克破裂及边界三维物理展开。在近两年的运行中, J-TEXT 装置上升级了共振扰动场系统, 由原有的 12 组线圈增加到 24 组, 大大提升了扰动场的调节能力。成功运行了高场侧偏滤器线圈, 实现了高场侧偏滤器位形放电。500kW 电子回旋共振加热系统投入使用, 有效地将电子温度提升至 1.5keV。国内研制的首套散裂弹丸系统完成了调试与安装, 完善了 J-TEXT 装置上破裂缓解手段, 获得了较好的初步实验结果。诊断系统也不断完善, 真空紫外诊断、多普勒反射仪、电子回旋辐射成像等多套先进诊断也陆续投入使用。基于以上的升级和完善, 实验室研究人员与国内外同行一起在 J-TEXT 上开展了破裂机理及缓解、共振扰动场与等离子体相互作用、湍流输运等一系列的实验研究, 获得了许多新的实验结果。

¹ See appendix.

面向聚变堆的 EAST 高约束模偏滤器脱靶控制研究进展

王亮^{1*}, 袁旗平¹, 李克栋¹, 吴凯¹, 许吉祥¹, 刘建斌¹, 孟令义¹, 段艳敏¹, 张斌¹, 曹斌¹, 杨钟时¹, 丁芳¹, 张凌¹, 丁锐¹, 徐国盛¹, 肖炳甲¹, 罗广南¹, 龚先祖¹, D. Eldon², H. Q. Wang², H. Y. Guo², J. Barr², A. W. Leonard², A. Hyatt², D. Thomas², D. Humphreys² and A. M. Garofalo²

¹中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

²General Atomics, P. O. Box 85608, San Diego, CA 92186, USA

*E-mail: lwang@ipp.ac.cn

摘要: 偏滤器靶板极高热流以及钨杂质溅射的主动控制是 EAST 和未来 ITER、CFETR 稳态运行面临的严峻挑战。国际聚变界普遍认可偏滤器脱靶是稳定控制稳态高热负荷、等离子体与壁相互作用最为有效的途径。2016 年以来, EAST 在 ITER-like 水冷钨偏滤器运行条件下, 长脉冲 H 模脱靶的主动反馈控制研究上取得了重大实验进展。通过开展一系列系统性的物理实验, 成功发展了多种长脉冲脱靶反馈控制的方法, 分别实现了辐射功率、偏滤器

粒子流翻转、偏滤器电子温度 $<5\text{eV}$ 的主动反馈控制。利用偏滤器区域氖杂质、氩杂质气体的主动注入, 均达到了脱靶的稳定维持, 进而有效降低了偏滤器靶板的稳态热流并达到了对钨杂质源的有效抑制。更为重要的是, 在脱靶反馈控制的过程中, 中心等离子体约束性能并没有出现明显的下降 (H_{98} 模式能量约束增强因子 H_{98} 大于 ITER 基本运行模式), 达到了偏滤器-中心等离子体的高度兼容。其中的辐射反馈控制和热流、脱靶机理, 通过开展联合实验, 在 DIII-D 的高 β_p 运行模式下实现了进一步的实验验证, H_{98} 稳定维持在 1.5。图 1 分别给出了 EAST 上 H 模靶板 Te 反馈 (5eV)、DIII-D 上高 β_p 模式的辐射反馈控制脱靶的实验结果。

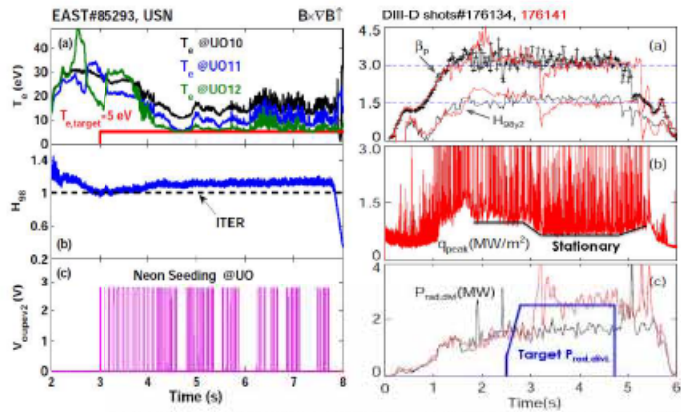


图 1. (左) EAST 采用偏滤器电子温度、(右) DIII-D 采用辐射偏滤器分别实现的 H 模脱靶反馈控制, 均与中心等离子体高度兼容。

EAST 实验还在不同脱靶度的条件下, 观察到一种稳定重复的、在脱靶-非脱靶之间周期性调制的 dithering 偏滤器状态, 为未来聚变堆的稳态运行提供了一种新的、具有应用前景的偏滤器模式。利用上面提到的三种反馈控制方法, 还成功演示了“Te+辐射功率”的反馈控制模式。EAST 和 DIII-D 联合研究表明磁场梯度漂移 $B \times \nabla B$ 和偏滤器区域的电漂移 $E \times B$ 、封闭性在脱靶的获得和稳定维持中起着非常重要的作用。这些最新的偏滤器脱靶主动控制进展及其物理机制的理解, 对 EAST 未来的高参数长脉冲 H 模运行、ITER 和 CFETR 的偏滤器-台基-芯部兼容集成提供了重要的科学参考。

关键词: 偏滤器脱靶, 反馈控制, 边界芯部兼容, EAST

参考文献

- [1] K. Wu, Q. P. Quan*, B. J. Xiao, L. Wang* et al., Nucl. Fusion 58, 056019 (2018)
- [2] L. Wang* et al., Nucl. Fusion 59, 086036 (2019)
- [3] L. Wang* et al., “Latest advances in active control of H-mode detachment and its physics on EAST for ITER/CFETR”, 3rd IAEA Technical Meeting on Divertor Concepts, 4–7 Nov, 2019 IAEA Headquarters, Vienna

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2017YFE0301300)、国家自然科学基金 (Nos. 11575236、11922513)、安徽省杰出青年科学基金 (No. 1808085J07)。

CFETR 等离子体设计研究进展

陈佳乐、周呈熙、Vincent Chan、朱毅仁、李泽宇、李国强、任启龙、谢远
来、简翔、CFETR 物理设计组

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

Email: jjale.chen@ipp.ac.cn

摘要: 中国聚变工程实验堆 (CFETR) 目标包括演示聚变功率从 200 MW 到 1 GW (DEMO 等离子体量级) 的等离子体, 实现高占空比运行和“氦自持”等等[1]。设计 CFETR 等离子体的一个关键问题是在功率受限的条件下, 如何设计同样一套的加热与电流驱动 (H&CD) 系统, 实现稳态模式与混合模式运行的 1 GW 聚变功率等离子体。从零维概念设计出发, 我们使用包含芯部-台基耦合的集成模拟进行等离子体设计。其中, 芯部湍流输运采用纯理论化的模型 TGLF, 台基结构采用刮削-气球模稳定性与动力学气球模组合模型 EPED-1, 从而避免了对现有装置实验定标率的依赖。初步的集成模拟结果已在有关设计起点的报告[1]中有所介绍。本报告着重介绍最新进展, 及许多需要深入研究的物理问题。

对于包含欧姆电流的混合运行模式, 通常的高约束模 (H 模) 等离子体足以支持平顶段放电。对台基密度的扫描发现, 只有高密度才能获得近 1GW 的聚变功率。我们采用螺旋波在该区域实现强的电流驱动, 并与低杂波离轴电流驱动进行了比较。高能量切向注入中性束可以提供可观的近轴电流驱动。为了与工程设计兼容, 中性束的注入角度与功率都有所下调。为了高驱动效率, 电子回旋波注入采用顶部发射。这些组合可以在较深的芯区 ($\rho \leq 0.4$) 维持一个剪切较弱的安全因子剖面。输运分析表明湍流产生的粒子箍缩非常重要。我们也对该运行模式的理想磁流体不稳定性与边界局域模做了简要分析。

对于稳态运行模式, 我们设计了一个高极向比压的先进运行模式, 在小半径中间位置 ($\rho \sim 0.5$) 形成内部输运垒 (ITB)。在 ITB 处, 湍流输运被反磁剪切显著削弱。使用局域的射频波电流驱动是控制反磁剪切位置的关键, 可以同时得到较好的约束和维持较高的理想磁流体比压极限 ($\sim 4I_i$)。优化的螺旋波与电子回旋波组合, 可以提供足够局域的射频波电流驱动。

目前上述两种运行模式还再做进一步微调, 解决前述关键问题, 最终完成堆芯-台基相自洽的等离子体设计。

关键词: 中国聚变工程实验堆, CFETR, 托卡马克运行模式, 集成模拟, 托卡马克加热与电流驱动, 聚变等离子体

参考文献

【1】 Zhuang et al, Progress of the CFETR design, Nucl. Fusion 2019, 59, 112010

基金项目: 国家重点研发项目计划 No. 2017YFE0300500, 2017YFE0300501

强场激光等离子体相互作用的若干物理研究

刘建胜

上海师范大学, 中国科学院上海光学精密机械研究所

基于级联激光尾场电子加速, 提出了通过控制第二个空泡捕获电子束, 获得更低能散度高性能电子束的级联加速新方案。通过控制电子束稳相加速、啁啾反转和能散度压缩, 克服了单级尾波场加速方案中能散度无法独立控制的技术瓶颈, 实验获得了高品质的高能电子束。此外, 提出了利用电子束的能量啁啾和纵向加速场的梯度分布对电子束纵向尺寸进行压缩从而压缩能散度的新方案, 克服了以往能散度和电荷量相互制约的障碍, 获得了千分之一级低能散度、高流强的高亮度电子束。

提出了在超强超短激光驱动的等离子体摇摆器中操控电子束横向振动获得高亮度高能 x 射线辐射源的新方案。通过引入一特定结构的等离子体密度分布, 实现了低能散度电子束的产生和横向振动的独立控制。在不破坏电子束能散度的条件下, 显著增强了 betatron 辐射的光子产额和能量。

提出了一种全光驱动的微型波荡器新概念。利用一束飞秒强激光辐照与头发丝直径相当的金属丝靶, 通过激光等离子体的强相互作用产生定向的高能电子发射, 由于电荷分离效应, 在金属丝上瞬间产生一个极强的径向瞬态电场; 沿金属丝方向附近发射的大量高能电子在径向电场的作用下被导引, 沿金属丝传输并进行周期性螺旋运动, 获得了非线性放大的强 THz 辐射输出。

通过操控飞秒激光脉冲序列与高密度固体靶相互作用, 利用飞秒强激光驱动强流电子束在等离子体中诱导韦伯不稳定性的增长, 实验观测到了周期分布的电子成丝结构以及强度高达千特斯拉的强磁场阵列及其演化过程, 峰值磁场强度达 2 千特斯拉。研究揭示了强激光驱动的电子韦伯不稳定性的非线性增长以及磁场的放大过程。

References

1. J. S. Liu, *et al.*, "All-optical cascaded laser wakefield accelerator using ionization-induced injection," *Phys. Rev. Lett.* **107**, 035001 (2011).
2. Wentao Wang, Wentao Li, Jiansheng Liu, Zhijun Zhang, Rong Qi, Changhai Yu, Jiaqi Liu, Zhiyong Qin, Ming Fang, Cheng Wang, Yi Xu, Fenxiang Wu, Yuxin Leng, Ruxin Li, and Zhizhan Xu., "High-brightness high-energy electron beams from a laser wakefield accelerator via energy chirp control," *Phys. Rev. Lett.* **117**, 124801 (2016).
3. Z. J. Zhang *et al.*, "Energy spread minimization in a cascaded laser wakefield accelerator via velocity bunching," *Phys. Plasmas* **23**, 053106 (2016).
4. C. H. Yu *et al.*, "Ultrahigh brilliance quasi-monochromatic MeV γ -rays based on self-synchronized all-optical Compton scattering," *Sci. Rep.* **6**, 29518 (2016).
5. Changhai Yu, Jiansheng Liu, Wentao Wang, Wentao Li, Rong Qi, Zhijun Zhang, Zhiyong Qin, Jiaqi Liu, Ming Fang, Ke Feng, Ying Wu, Lintong Ke, Yu Chen, Cheng Wang, Yi Xu, Yuxin Leng, Changquan Xia, Ruxin Li and Zhizhan Xu, "Enhanced betatron radiation by steering a laser-driven plasma wakefield with a tilted shock front", *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 133503 (2018).
6. Ye Tian, Jiansheng Liu, Yafeng Bai, Shiyi Zhou, Haiyi Sun, Weiwei Liu, Jiayu Zhao, Ruxin Li, Zhizhan Xu, "Femtosecond-laser-driven wire-guided helical undulator for intense terahertz radiation," *Nat. Photon.* **11**, 242 (2017).
7. Shiyi Zhou, Yafeng Bai, Ye Tian, Haiyi Sun, Lihua Cao, Jiansheng Liu, "Self-organized kilo-Tesla magnetic-tube array in an expanding spherical plasma irradiated by kHz femtosecond laser pulses", *Phys. Rev. Lett.* **121**, 255002 (2018).

PW 激光产生强辐射源及在 MeV 光子对撞机中的应用

余金清

湖南大学物理与微电子科学学院

Email: jinqing.yu@hnu.edu.cn

根据爱因斯坦质能方程和量子电动力学理论，在一定条件下光子（能量）可以转化成物质，这对研究物质世界的起因有着举足轻重的作用，与之相关的理论研究始于上世纪30年代，然而直到60多年后的1997年，美国SLAC实验室才首次在试验中观测到多光子碰撞产生正负电子对的过程。而对于两个高能光子的相互作用过程，也就是常说的 $\gamma\gamma$ 对撞机，到目前为止实验中还未观测到 $\gamma\gamma$ 的相互作用过程。在 $\gamma\gamma$ 对撞机中， $\gamma\gamma$ 的相互作用过程发生的次数与光子数目和光子-光子截面成正比，与光子束的脉冲宽度、两束光子束的交叉面积成反比。在实验中，不能观测到 $\gamma\gamma$ 的相互作用过程是由于已有 γ 射线源的流强和亮度还达不到实验要求。

近年来，随着激光技术的发展，特别是PW-10PW激光器的建成，激光光强可能达到 $10^{23}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上。当PW激光与物质相互作用时，大部分激光能量被物质吸收并转化成 γ 射线辐射源，如果可以有效控制 γ 射线的发散角，辐射的 γ 射线源的流强和亮度将会达到前所未有的高度。

我们提出了基于双10PW激光产生超高准直 γ 束的 $\gamma\gamma$ 对撞机方案，在该方案中， γ 射线的发散角可以降低到3度以下，而 γ 射线的亮度和流强会比之前的工作高两个数量级。将该超高亮度的 γ 射线应用于 $\gamma\gamma$ 对撞机，理论计算结果表明，该方案可以获得超高信噪比（ $>10^5$ ）且每一发正负电子对信号（ $>10^8$ ）远高于现有测量技术的最低限度。因此，应用该方案可以在实验室中验证 $\gamma\gamma$ 相互作用过程中由能量到物质的产生过程。

相对论激光驱动近临界密度等离子体产生高轨道角动量粒子束研究

余同普¹、朱兴龙²、胡理想¹、邹德滨¹、银燕¹、盛政明²、邵福球¹¹国防科技大学文理学院物理系, 长沙 410073²上海交通大学物理与天文学院&IFSA 协同创新中心, 上海 200240

Email: tongpu@nudt.edu.cn

摘要: 超强激光和等离子体相互作用可以产生超短辐射源和稠密正负电子对, 但是通过激光等离子体的方法来操纵带电粒子和光子束的微结构, 特别是其轨道角动量, 至今任然没有实现。我们通过全三维数值模拟, 提出了一种产生和调节高亮度伽马射线和正电子束轨道角动量的新方案。方案中我们通过采用两束不同手性的圆极化激光在近临界密度等离子体中的对撞, 实现了光子束和带电粒子束的轨道角动量的全光学操控。在这个方案中, 等离子体主要起着“媒介”的作用, 用来吸收和传递激光能量及轨道角动量给捕获电子, 电子被加速到GeV能量后, 通过与第二束激光的对撞, 激活非线性康普顿散射, 从而实现了高能量、高亮度、高轨道角动量的伽马光子束辐射, 最后通过多光子Breit-Wheeler过程实现了稠密正电子束的产生。在相互作用过程中, 被捕获电子的轨道角动量逐步转移给了光子束, 使得辐射的高能伽马光子束携带有高轨道角动量, 从而实现了微米尺度内对高能带电粒子束和伽马光子束的操控, 通过改变驱动光和被散光的偏振, 我们可以进一步实现对产生的带电粒子束和光子束的微操控。获得的高能量密度和高轨道角动量的粒子束有望未来在实验室天体物理、高能量密度物理以及基础物理研究方面得到广泛应用。

关键词: 近临界密度等离子体、非线性康普顿散射、Breit-Wheeler 过程、轨道角动量

参考文献

- 【1】Turcu *et al*, Quantum electrodynamics experiments with colliding petawatt laser pulses, *High Power Laser Science and Engineering* 2019, 7, c10.
- 【2】Zhu *et al*, Bright attosecond γ -ray pulses from nonlinear Compton scattering with laser illuminated compound targets, *Appl. Phys. Lett.* 2018, 112, 174102.
- 【3】hu *et al*, Generation of GeV positron and γ -photon beams with controllable angular momentum by intense lasers, *New J. Phys.* 2018, 20, 083013.
- 【4】ang *et al*, High-flux x-ray photon emission by a superluminal hybrid electromagnetic mode of intense laser in a plasma waveguide, *Plasma Phys. Control. Fusion* 2019, 61, 085026.

基金项目: 国家重点研发计划(NO. 2018YFA0404802)、国家自然科学基金项目(NO. 11622547, 11875319)、霍英东青年教师基金(NO. 161007)、湖南省自然科学基金(NO. 2017JJ1003)和国防科技大学科研计划重点项目(ZK18-02-02)。

可重频工作激光尾场电子加速与微焦点伽马射线源研究进展

谷渝秋

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

Email: yqgu@caep.cn

激光等离子体尾场电子加速技术近年来得到了广泛研究, 电子的能量和束品质都得到了极大提高。然而与传统加速器相比, 激光等离子体尾场电子加速器可以产生数十微米甚至微米级的电子束斑, 可以用于产生微焦点的伽马射线源, 但是从应用角度来说, 必须提高激光等离子体尾场电子加速的稳定性和工作重复频率, 然而这方面的工作还比较少。本文将介绍中物院激光聚变研究中心在应用需求的牵引下, 基于 45TW 飞秒激光器解决了激光尾场电子加速的稳定性和可重复频率工作问题, 并对激光尾场电子加速器产生的微焦点源的性能进行了细致研究, 成功演示了基于激光尾场电子加速的微焦点伽马射线源 CT 成像技术。

激光聚变中考虑磁场效应的流体力学模型

曹莉华^{1,2}

¹北京应用物理与计算数学研究所

²北京大学应用物理与技术研究中心

Email: cao_lihua@iapcm.ac.cn

摘要: 美国 NIF 激光器开展的激光聚变点火遇到了巨大困难和挑战, 人们对其中的重要物理过程还没有达到完全的认识, 其中激光等离子体相互作用产生的强磁场也受到了极大的关注。

黑腔中不对称的密度和温度梯度会导致电流流动, 形成强的磁场 (兆高斯量级), 该磁场会影响黑腔内的低密度等离子体的动力学特性, 导致激光束偏转, 影响激光的吸收或散射。另一方面, 强磁场为惯性约束聚变、高能量密度物理提供了新的思路和改进措施, 磁场强度为 10^2 - 10^3 T 的磁场可对激光惯性约束聚变中的激光等离子体相互作用物理和内爆物理进行优化, 有可能改善等离子体状态, 有望降低点火能量阈值, 提高聚变增益, 在现有激光器条件下实现点火。

北京应用物理与计算数学研究所发展的激光聚变二维柱对称非平衡辐射流体力学程序, 主要用于黑腔物理和靶丸物理研究, 能模拟激光间接驱动聚变的整个物理过程, 也可用于单独研究激光直接驱动或激光间接驱动的黑腔物理和内爆物理过程等。该程序的物理建模中未考虑磁场效应, 一方面, 激光聚变过程中在黑腔内和内爆过程中均会产生强磁场, 另一方面, 外加强磁场为激光聚变提供了新的思路和改进措施, 非常值得关注, 因此在辐射流体力学程序中增加考虑磁场效应后的物理建模是必要的, 也是非常重要的。

本报告将给出激光聚变中考虑磁场效应的流体力学模型, 包括强磁场中的热传导模型、辐射磁流体力学方程组等。

High Charge Electron Acceleration from Solid Target

L. M. Chen^{1,2,3,4}

¹ *IFSA Collaborative Innovation Center and School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China*

² *Institute of Physics in Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

³ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

⁴ *Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523808, China*

Collimated electron beams produced by intense laser pulses focused onto solid-density plasmas are studied intensively for many applications. Experiments and simulations have shown that the electron beams are emitted at an angle between laser specular and the target normal direction. In particular, an electron jet emitted along the target surface has been observed using large angles of incidence during laser irradiation of solid targets. However, the target surface electron energy spectrum shows a 100% energy spread in most cases, save for a few experiments [1] with low beam charge and large beam divergence angle ($> 20^\circ$).

We systematically studied the relationship between the guiding of target surface electrons and fs laser parameters. When a nanosecond prepulse was added without picosecond ASE, the electron beam became concentrated and intense. We obtained a 0.8-MeV peaked electron beam with a charge of 100 pC in a single shot and a divergence angle as small as 3° [2].

High-quality monoenergetic target surface accelerated electron beams with small normalized emittance (0.03π mm mrad) and large charge per shot have been observed from a 3 TW laser-solid interactions. The 2D PIC simulation reveals that a bubble-like structure as an accelerating cavity appears in the near critical density plasma region. A bunch of electrons is pinched transversely and accelerated longitudinally by the wake field in the bubble [3].

Besides these results obtained by using small size fs lasers, we also performed TSA experiment using sub-ps high power lasers such as PHELIX in GSI and TITAN in LLNL. Ten MeV monoenergetic and highly collimated ($< 2^\circ$) electron beam with 8nC was observed on PHELIX. The Maximum beam charge of 100 nC are obtained on TITAN [4]. The Direct Laser Acceleration might be the acceleration mechanism in ps-laser/solid interaction. The good pointing stability and reproducibility of such a ultra-high charge electron beam makes it possible an ideal beam for fast ignition on ICF and drive the warm/hot dense matter.

[1] T. E. Cowan *et al*, NIMA 455, 130 (2000); L. M. Chen *et al.*, Phys. Rev. Lett.100, 045004 (2008); A. G. Mordovanakis, Phys. Rev. Lett.103, 235001 (2009)

[2] J. Y. Mao *et al*, PRE 85, R025401(2012); W. M. Wang *et al*, HEDP 9, 578(2013)

[3] J. Y. Mao *et al*, Appl. Phys. Lett. 106, 131105(2015)

[4] Y. Ma *et al*, PNAS 115, 6980(2018); J. Y. Mao *et al*, Opt. Lett. 43, 3909(2018)

等离子体稳态均匀湍流输运方程及应用

王少杰

中国科学技术大学

摘要:

对于稳态均匀湍流, 通过引入熵增原理, 由非线性 Vlasov 方程出发导出了等离子体相空间输运的 Fokker-Planck 方程。理论证明了相空间扩散张量的对称性。当粒子运动轨迹已知时, 相空间扩散张量可通过系综平均直接计算出来。基于相空间输运方程, 发展了系统地计算宏观输运矩阵的方法。

作为该理论的应用:

(1) 我们证明了平行于磁场方向的平均电场通过 Stokes-Einstein 关系驱动平行粒子流 (电流), 该结论与涨落的具体特征无关, 这有助于理解反常电阻;

(2) 我们计算了湍流宏观输运矩阵, 并导出了反常电流扩散, 这有助于理解托卡马克实验观察到的反常电流穿透;

(3) 我们发展了湍流宏观输运矩阵计算程序, 利用该程序可以结合托卡马克等离子体回旋动力学湍流模拟的涨落电场系统地计算出宏观输运矩阵, 这有助于进一步将湍流输运的理论模拟和实验研究紧密结合起来。

参考文献:

S Wang, Phys. Plasmas 23, 022303 (2016)

Two plasmon decay of energetic particle induced geodesic acoustic mode

Z. Qiu*

Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P.R.C.

Energetic particle induced geodesic acoustic mode (EGAM) has draw much attention due to its potential role as an active control of drift wave type turbulences. EGAM is typically characterized by a frequency lower than the local geodesic acoustic mode (GAM) frequency. However, in a Large Helical Device (LHD) experiments [1], it is observed that EGAM frequency can be significantly higher than local GAM frequency; and as the EGAM frequency chirping up, a secondary mode with frequency being half of the primary EGAM is suddenly driven unstable. This experiment is reproduced in a recent MEGA simulation [2].

In this work, we show that, this unusual phenomenon is related to the peculiar discharge of LHD, i.e., the plasma temperature is very high while the density is very low, so the injected neutron beam is not fully slowly down before driving EGAM unstable. The EGAM driven unstable by the positive energy slope can have a frequency significantly higher than local GAM frequency [3]. The excitation of the secondary mode is perfectly explained using two-plasmon decay of the primary unstable EGAM into two linearly stable GAMs.

References

- [1] T. Ido, K. Itoh, M. Osakabe, et al, Phys. Rev. Lett. **116**, 015002 (2016).
- [2] H. Wang, Y. Todo, T. Ido and Y. Suzuki, Phys. Rev. Lett. **120**, 175001 (2018).
- [3] J. Cao, Z. Qiu and F. Zonca, Phys. Plasmas **22**, 124505 (2015).

*In collaboration with Liu Chen and Fulvio Zonca

A mechanism of neoclassical tearing modes onset by drift wave turbulence

蔡辉山

中国科学技术大学物理学院, 合肥 230026

Email: hscai@mail.ustc.edu.cn

The evolution of neoclassical tearing modes (NTMs) in the presence of electrostatic drift wave turbulence is investigated. In contrast with anomalous transport effect induced by turbulence on NTMs, a new mechanism that turbulence-driven current can affect the onset threshold of NTMs significantly is suggested. Turbulence acts as a source or sink to exchange energy with NTMs. The turbulence-driven current can change the parallel current in magnetic islands and affect the evolution of NTMs, depending on the direction of turbulence intensity gradient. When the turbulence intensity gradient is negative, the turbulence-driven current enhances the onset threshold of NTMs. When the turbulence intensity gradient is positive, it can reduce or even overcome the stabilizing effect of neoclassical polarization current, leading to a small onset threshold of NTMs. This implies that NTMs can appear without noticeable magnetohydrodynamics (MHD) events.

Keywords: neoclassical tearing modes, turbulence

References:

[1] Huishan Cai, 2019 Nucl. Fusion 59 026009

Acknowledge: National Natural Science Foundation of China under Grant Nos. 11822505, 11835016, and National Key R&D Program of China and the Key Research Program of Frontier Sciences, CAS under Gants No. 2014GB106004, No. QYZDJSSW-SYS016, and Youth Innovation Promotion Association CAS.

强磁化等离子体碰撞与弛豫过程的理论研究

董超、李定、张文禄

中国科学院物理研究所, 北京 100190

Email: chaodong@iphy.ac.cn

摘要: 强磁化等离子体广泛存在于自然界与实验室环境中, 在这些强磁化等离子体中, 电子热回旋半径远小于德拜长度, 因此需要考虑磁场对电子碰撞及相关输运过程的影响。我们采用 Fokker-Planck 方法推导强磁化等离子体动力学方程, 通过坐标变换成功导出磁化 Fokker-Planck 方程的一般形式, 给出磁化 Fokker-Planck 系数的推导方法; 接着分别采用二体碰撞理论与波理论推导磁化 Fokker-Planck 系数, 得到磁化 Landau 碰撞项与磁化 Balescu-Lenard-Guernsey 碰撞项; 这些碰撞项考虑了磁场效应与动力学极化效应, 满足粒子数、动量与能量守恒以及 H 定理。采用得到的磁化碰撞项我们理论研究强磁化等离子体中的弛豫过程, 包括高能离子与电子碰撞导致的慢化过程以及电子-离子温度弛豫过程, 得到了相应的弛豫速率。发现: (1) 磁场显著影响由碰撞参数大于电子热回旋半径的碰撞所引起的弛豫过程; (2) 磁场加快高能离子与电子平行运动分量之间的能量传递, 减慢高能离子与电子垂直运动分量之间的能量传递; (3) 固定磁场强度, 随着高能离子速度的增加, 初始时磁场加快与电子碰撞导致的高能离子慢化过程, 当高能离子速度超过一定阈值, 磁场减慢其慢化过程; (4) 当高能离子速度超过电子热速度时, 高能离子-电子碰撞过程由高能离子运动主导, 此时如果有效碰撞时间小于电子回旋周期, 磁场将不对碰撞过程产生影响; (5) 当离子热速度远小于电子热速度时, 磁场显著加快电子-离子温度弛豫过程, 电子-离子温度弛豫速率含有一个双对数项, 来源于电子平行运动分量与离子垂直运动分量之间的能量传递。上述研究对等离子体基础理论、加热与能量输运等有重要意义。

关键词: 强磁化等离子体 Fokker-Planck 方程 磁化碰撞项 慢化 温度弛豫

【1】C. Dong, H. Ren, H. Cai, and D. Li, Temperature relaxation in a magnetized plasma, *Phys. Plasmas* 2013, 20 (10), 102518.

【2】C. Dong, W. Zhang, and D. Li, Fokker-Planck equation in the presence of a uniform magnetic field, *Phys. Plasmas* 2016, 23 (8), 082105.

【3】C. Dong, W. Zhang, J. Cao, and D. Li, Derivation of the magnetized Balescu-Lenard-Guernsey collision term based on the Fokker-Planck approach, *Phys. Plasmas* 2017, 24 (12), 122120

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11875067)

国家磁约束核聚变能发展研究专项 (NO. 2018YFE0311300)

球内爆瑞利-泰勒不稳定性三维效应研究

张靖

北京应用物理与计算数学研究所

地址: 北京海淀区丰豪东路 1 号 100094

邮箱: 4495932@163.com

摘要: 作为一种广泛存在的流体力学不稳定性, 瑞利-泰勒不稳定性 (RTI) 是制约惯性约束聚变 (ICF) 的关键物理问题, 也是天体物理中超新星爆炸的重要研究内容。目前, 关于 RTI 的理论研究已经逐步由平面几何扩展到适用性更强的圆柱几何和球几何中, 由平面二维情况扩展到平面三维情况, 但涉及到球几何三维情况下的 RTI 发展的基础研究较少。国外相关模拟结果表明, 对于 ICF 靶丸内爆过程, 采用轴对称的二维模拟通常会高估聚变性能, 不能较好地再现实验结果, 可知三维效应在内爆过程中起到重要作用。在内爆过程中的高收缩比条件下, 平面近似过于粗糙, 因此三维球几何下的 RTI 发展成为一个重要的应用性和基础性问题。我们尝试以解析理论方法为主, 运用势流模型, 针对 RTI 发展的非线性阶段的前期, 使用微扰方法, 进行不同阶的级数展开, 通过求解各阶方程, 研究三维球几何下 RTI 在弱非线性阶段的发展, 同时与模拟结果相对照。结果发现, 与线性阶段的发展不同, 弱非线性阶段的 RTI 发展依赖于方位角模数, 非线性阈值、频谱结构、气泡尖钉增长均受方位角模数影响。另外, 发现极角与方位角方向更对称的模式 (Y_{lm} , 其中 $m \sim l/2$) 增长较快, 是更危险的模式。研究成果为我国点火靶设计提供了物理基础支持, 同时深化了对国防内爆和天体物理相关问题的物理解释。

关键词: 球几何, 三维效应, 瑞利-泰勒不稳定性, 弱非线性

左旋圆偏振激光在轴向强磁化等离子体中的受激拉曼散射不稳定性

潘凯强¹、郭亮¹、李志超¹、杨冬¹、李三伟¹、江少恩¹、张保汉¹、郑春阳²、

贺贤土²

1.中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900

2.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

Email: smile8902@qq.com

摘要: 本文利用一维和二维 particle-in-cell (PIC) 粒子模拟细致地研究了轴向强磁化等离子体中左旋圆偏振激光的受激拉曼散射 (SRS) 不稳定性。数值模拟结果表明, 由于左旋圆偏振激光在轴向强磁化等离子体中拥有更高的传播截止密度, 其发生 SRS 不稳定性的截止密度也将超出非磁化等离子体中激发 SRS 的截止密度, 即四分之一临界密度 (激光在非磁化等离子体中能够传播的最大等离子体密度)。当磁场足够强时, SRS 甚至能够发生在临界密度附近, 而此时对应的散射光频率将非常低, 该特性可以用于受激拉曼放大来产生低频种子光, 这在非磁化等离子体中是无法实现的。数值模拟还表明, 左旋圆偏振激光的背向散射光了右旋圆偏振激光, 然而其在磁化等离子体中的色散关系却与入射激光保持相同的形式, 基于此本文重新推导了左旋圆偏振激光在轴向强磁化等离子体中 SRS 的线性增长率, 结果表明外加磁场强度越大, SRS 的线性增长率越低, 一维和二维的 PIC 数值模拟结果同时证明了该结论的正确性。数值模拟结果还表明, 外加磁场会导致 SRS 所产生的电子等离子体波的相速度减小, 从而使得电子等离子体波更容易俘获热电子以及发生非线性频率平移, 由此导致磁化等离子体中的 SRS 更容易饱和。通过参数扫描发现, 当磁场强度足够强时, SRS 的饱和水平被抑制了好几倍, 因此该工作同时给出了一种有效的抑制 SRS 不稳定性的手段。需要特别指出的是, 在二维数值模拟中, 电子等离子体波的一些横向不稳定性也会被外加磁场所抑制, 这对于受激拉曼放大是非常有利的。

关键词: 激光等离子体不稳定性、受激拉曼散射、磁化等离子体、PIC 数值模拟

基金项目: 科学挑战计划项目 (NO. TZ2016005)、中国博士后科学基金 (NO. 2017M620430) 国家自然科学基金项目 (NO. 11705180) 等。

**Parametric Instability of High frequency RF waves and application
to Ionospheric-heating experiment**

Yu Liu, Yiming Ling, and Jiuhou Lei

CAS Key Laboratory of Geospace Environment, School of Earth and Space Science,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract In the work, controlled laboratory experiments were designed to simulate ionospheric heating experiments in a collisional plasma environment of the ionosphere. Energy of radio wave can be transferred into ionospheric plasma wave through the heating process, which includes the nonlinear evolution of ionospheric plasma. Parametric decay instability (PDI) generated by the collisional plasma flow is observed in the laboratory. When a HF heating (pump) wave (165 MHz, near upper hybrid frequency) is launched in the Keda Space Plasma Experiment (KSPEX) at USTC, three daughter modes are produced. Additionally, the diagnostic results confirm that frequency and wave number matching relations are satisfied. The results could help to understand the generation mechanism of the parametric instability, which provides effective channels to convert electromagnetic heating waves to electrostatic plasma waves in the F region of the ionosphere.

KTX 反场箍缩实验装置诊断系统升级及物理实验进展

刘万东, 兰涛, 毛文哲, 庄革, 李弘, 谢锦林, 刘阿娣, 周楚, 刘子奚, 吴征威, 郑坚, 袁鹏, 温晓辉, 周海洋, 卫子安, 汪海

中国科学技术大学 KTX 实验室, 物理学院工程与应用物理系, 合肥 230026

Email: wdlou@ustc.edu.cn

摘要: 科大一环 (KTX) 是近年来国内建成的首台中型反场箍缩 (RFP) 环形磁约束聚变实验装置。装置的物理研究目标主要定位于 RFP 位形下的等离子体物理以及与托卡马克的共性物理。RFP 在三维物理、电磁湍流、密度极限等方面与托卡马克有共性, 又表现出不同的特点。RFP 在大电流放电参数下, 等离子体通过自组织可形成三维的拓扑结构, 约束明显改善; RFP 具有较高的比压, 等离子体中芯部和边界的磁涨落比较明显, 电磁湍流对等离子体约束有着不可忽略的贡献; RFP 同样存在着密度极限, 但其破裂行为平缓, 且密度极限阈值较高。经过优化, KTX 装置上已经实现了三种不同类型的放电, 即 RFP 位形, 超低 q 放电和低电流托卡马克放电。根据 KTX 装置的研究目标, KTX 装置上已经发展和升级了系列的特色诊断系统, 并在装置上进行了初步的物理研究。KTX 装置上的等离子体诊断系统升级主要包括: (1) 发展了可测量导体壁完整闭合表面的电磁场的涡流探针, 电磁探针通道升级至 960 道, 实现 MHD 模式分辨 $m < 2, n < 24$; (2) 建成了基于太赫兹微波源的多道干涉仪系统, 反演得到电子密度剖面以及宽谱的电子密度涨落; (3) 建成了重复频率 200Hz 的汤姆逊散射系统, 散射信号的信噪比可实现 5eV 等离子体温度测量; (4) 建成了径向、极向和环向电磁湍流介入式三维探针系统; (5) 双膜软 X 射线系统, 反演得到截面 $m=1$ 的温度涨落模结构; (6) 建成边界高空间分辨的电容式介入探针系统, 直接测量等离子体 Dynamo 行为的电场分量; (7) 建成了多道杂质谱仪。主要物理研究包括: (1) 通过边界三维电磁探针和芯部干涉仪信号的前向散射, 获得了宽谱湍流信号的三维空间分布; (2) 应用涡流探针系统, 获得了等离子体 MHD 行为演化实时的动态成像; (3) 基于三维电阻粘滞 MHD 模拟程序 NIMROD 的数值研究发现, 在 KTX 位形下比压参数对于三维拓扑高约束 RFP 运行模式“QSH”态有正相关关联。目前 KTX 装置正在进行系统升级以提高运行能力, 为高电流 RFP 位形下等离子体的三维物理研究奠定基础。

关键词: KTX 反场箍缩 电磁湍流 三维物理

参考文献

- 【1】 Wandong. Liu *et al.*, An overview of diagnostic upgrade and experiment progress on KTX, *Nuclear Fusion*. 2019, 59 (11), 112013.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (NO. 2017YFE0301700), 国家自然科学基金项目 (NO. 11635008)

中国第一台准环对称仿星器 (CFQS) 的物理和工程设计

许宇鸿¹、刘海峰¹、刘海¹、A. Shimizu²、S. Kinoshita²、M. Isobe²、S. Okamura²、尹大鹏³、万艺³、熊国臻¹、张欣¹、黄捷¹、王先驱¹、程钧¹、唐昌建^{1,4}及 CFQS 团队^{1,2}

¹西南交通大学物理科学与技术学院聚变科学研究所, 成都 610031

²国家自然科学研究院国家核融合科学研究所, 日本土岐市 509-5292

³科烨电物理设备制造有限公司, 合肥 230000

⁴四川大学物理学院, 成都 610041

Email: liuhai@swjtu.edu.cn

摘要: 中国第一台准环对称仿星器 (CFQS) 是由中国西南交通大学 (SWJTU) 和日本国家核融合科学研究所 (NIFS) 共同设计和建造的聚变物理研究装置。该装置的物理和工程设计结合了当代托卡马克和仿星器的优点, 具有目前国际上最先进的磁约束位形, 从而为实现稳态高 β 等离子体提供了一种新的方案 [1,2]。通过对 CFQS 装置大半径、环径比、磁场强度、模块化线圈数目等参数的扫描, 以及各种不同参数下等离子体平衡、MHD 不稳定性、新经典和湍流输运等的仿真计算和分析, 最终确定最优化的参数为: 大半径 $R_0=1$ m, 环径比 $A_p=4$, 磁场强度 $B_t=1$ T, 模块化线圈数目 $N=16$, 环向周期数 $N_p=2$ [3-5]。计算表明, 由模块化线圈产生的磁面结构、旋转变换角 ι 和磁阱的空间分布以及磁场强度的傅里叶谱分布均与上述目标参数产生的结果相一致。从芯部到边界, 等离子体的旋转变换角设计值为 $2/6\sim 2/5$, 有利于避开低阶有理磁面及可能的撕裂模不稳定性。在整个等离子体区域均存在磁阱结构, 能够有效致稳 MHD 不稳定性, 并降低磁岛宽度。计算表明在 β 值不超过 1% 的情况下, CFQS 装置的 MHD 平衡均稳定。此外, 模拟结果显示 CFQS 中的新经典输运在 $1/\nu$ 区域与托卡马克中的新经典输运水平相当, 而利用 GKV 代码估算的非线性湍流输运比托卡马克中略低。与此同时, CFQS 的模块化线圈、真空室和支撑系统等工程设计也已初步完成。

关键词: CFQS, 位形, 设计

参考文献

- 【1】 S. Okamura *et al.*, Confinement characteristics of the quasi-axisymmetric stellarator CHS-qa, *Nucl. Fusion* 2004, 44, 575.
- 【2】 Y. Xu *et al.*, Physics and Engineering Design for Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator (CFQS), 27th IAEA, EX/p5-23.
- 【3】 H. Liu *et al.*, Magnetic Configuration and Modular Coil Design for the Chinese First Quasi-Axisymmetric Stellarator, *Plasma and Fusion Research* 2018, 13, 3405067.
- 【4】 A. Shimizu *et al.*, Configuration Property of the Chinese First Quasi-Axisymmetric Stellarator, *Plasma and Fusion Research* 2018, 13, 3403123.
- 【5】 M. Isobe *et al.*, Current Status of NIFS-SWJTU Joint Project for Quasi-Axisymmetric Stellarator CFQS, *Plasma and Fusion Research* 2019, 14, 3402074.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11820101004), 国家重点研发计划 (NO. 2017YFE0301705) 等。

Propagation Dynamics and Turbulence Acceleration Associated with Resonant Magnetic Perturbations in Magnetically Confined Plasmas

W.W. Xiao¹, T.E. Evans², G.R. Tynan³, S.W. Yoon⁴, J. Jeon⁴, W.H. Ko⁴, Y.U. Nam⁴, Y.K. Oh⁴

1) Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China;

2) General Atomics, PO Box 85608, San Diego, CA 92186-5608, USA ;

3) [Center for Energy Research](#), University of California San Diego, La Jolla, CA 92093, USA;

4) National Fusion Research Institute, Daejeon, Korea

wwxiao@zju.edu.cn

Developing a physics understanding of how Resonant Magnetic Perturbation (RMP) fields suppress or mitigate ELMs is a hot issue in current experimental and the theoretical studies. A new experiment using small edge perturbations produced by a Supersonic Molecular Beam Injection (SMBI) during RMP phase was used to explore the mechanism of ELM control by RMP. It suggests that the RMP penetrates into the pedestal region and first excites a plasma response on the $q=3$ rational surface. Subsequently, the RMP brakes the toroidal rotation (V_ϕ) on the $q=3$ rational surface and the turbulence increases. Meanwhile, the induced propagation of the particle and momentum transport by RMP is inward and outward from the $q=3$ surface. The increased turbulence and/or V_ϕ braking by the RMP is expected to be responsible for reducing the pedestal height leading to the suppression and/or mitigation of type-I ELMs. Low frequency turbulence increases in applied magnetic perturbation (MP), which has a parallel magnetic field with respect to the original magnetic field. This indicates that the normal direction of RMP coil plane perpendicular to the toroidal magnetic line in current design for ITER is the best way to control ELMs. These results provide further physical improvements needed to refine our knowledge of the mechanisms required to obtain ELM control using RMP in high confinement mode plasmas.

SUNIST 球形托卡马克研究进展

谭熠、高喆、王文浩、刘文斌、王首智、王彬彬、程争波、信韬

清华大学工程物理系, 北京, 100084

Email: tanyi@sunist.org

摘要: 由于磁场分布、磁力线形态等方面的显著差异, 球形托卡马克强场侧与弱场侧的进气特性区别很大。为此, 我们专门开发了一个可以内置于真空室的紧凑型快速响应超声速注入阀门, 并在 SUNIST 球形托卡马克尝试了强场侧进气, 从密度、MHD 活动、等离子体储能等方面与弱场侧进气进行了比较。等离子体电流爬升与下降阶段的 MHD 活动是 SUNIST 的另一个主要研究方向。同样的, 弱场侧与强场侧的偏压电极对于等离子体的影响也存在一定区别, 通过两个分别安装在真空室底部靠近中心柱位置和安装在弱场侧赤道面处的电极, 比较了强/弱场侧施加偏压对于等离子体参数的影响。非感应启动和电流驱动对于球形托卡马克极为重要。我们开发了一套高电流密度等离子体枪, 通过注入局域螺旋度, 用于非感应启动。此外, 通过调节环电压和平衡位置, 进一步研究了撕裂模对约束破坏的影响。

关键词: SUNIST, 球形托卡马克, 非感应启动, 撕裂模

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11175103, 11261140327, 11325524), 科学挑战计划 (TZ2016005)

利用超导托卡马克装置 EAST 探索先进偏滤器解决方案

司杭、郭后扬、徐国盛、王亮、丁锐、肖炳甲、罗正平、张洋、张晓东和 EAST 团队

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

Email: hsi@ipp.cas.cn

摘要: 偏滤器是托卡马克装置一个至关重要的部件, 有关先进偏滤器的设计、建造及运行也一直是托卡马克研究领域里热点问题之一。设计优化先进偏滤器位形通常从以下两个方面入手: 1) 优化偏滤器靶板几何位形——偏滤器封闭性, 所谓偏滤器封闭性是指能够约束在偏滤器区域中性粒子占偏滤器区域所产生的全部再循环中性粒子的比例, 即偏滤器封闭程度越好, 从偏滤器区域逃脱的中性粒子比例就越少。通过优化提高偏滤器封闭性, 从而显著增加约束在偏滤器区域的中性粒子密度, 进而提高偏滤器区域中性气压, 改善偏滤器粒子排除能力, 降低偏滤器靶板区域电子温度, 有效抑制靶板表面杂质溅射, 在较低的上游分界面密度条件下即可形成和稳定维持部分脱靶/脱靶状态, 有效缓解偏滤器靶板热负荷, 最终实现对偏滤器靶板热流粒子流的有效控制。2) 优化偏滤器磁场位形——偏滤器磁拓扑结构, 主要利用雪花磁位形、X-Divertor 磁位形等增大磁场连接长度, 扩展边界等离子体与偏滤器靶板接触面积等, 从而缓解偏滤器靶板热负荷。

本工作主要总结了如何利用超导托卡马克装置 EAST 不断探索和验证这些先进偏滤器解决方案。在 EAST 新下钨偏滤器设计优化过程中, 充分考虑了增加偏滤器封闭性这一设计要素, 使得新偏滤器位形在较低上游密度条件下即可进入部分脱靶/脱靶状态, 从而有效抑制靶板钨杂质溅射, 缓解偏滤器靶板热负荷, 与芯部主等离子体兼容。与此同时, 目前已经在 EAST 成功实现了先进磁场位形——准雪花位形 [1]和鱼尾位形 [2], 通过增大偏滤器靶板磁通扩展和摆动打击点, 可以大幅缓解偏滤器靶板热负荷。因此, 在未来托卡马克偏滤器设计优化中, 增加偏滤器封闭性、采用先进磁场位形, 及将二者耦合将是潜在的设计方案。

关键词: EAST, 偏滤器, 封闭性, 先进磁场位形, 脱靶

参考文献

[1] G. Calabro *et al*, EAST alternative magnetic configurations: modelling and first experiments, Nucl. Fusion 2015, 55, 083005.

[2] X.D. Zhang *et al*, Fishtail divertor – Swing strike point for active control of heat load on divertor plant, 2nd IAEA Technical Meeting on Divertor Concepts, Suzhou, China, 13-16 November 2017

致谢: 国家重点研发计划 (2017YFA0402500, 2017YFE0300402), 国家自然科学基金项目 (11505234, 11347113, 11575235, 11422546, 11575236, 11675218, 11575244, 11775269) 等

HL-2A 上相衬成像诊断的研制和最新实验结果

余羿*、龚少博、许敏、聂林、柯锐、石中兵、钟武律、兰涛、孙爱萍、龙婷、

吴一帆、袁博达、刘灏、吴婷、段旭如、叶民友

中国科学技术大学, 合肥 230026
核工业西南物理研究院, 成都 610041

*Email: yuyi@ustc.edu.cn

摘要: 本文介绍了 HL-2A 托卡马克上相衬成像 (Phase Contrast Imaging, PCI) 诊断的研制, 以及近期的湍流实验结果。PCI 诊断对等离子体电子密度涨落弦积分进行光学诊断, 其基本原理是激光与等离子体相互作用发生散射, 利用相位调制实现对散射光强的直接测量, 得到不同等离子体湍流的多尺度谱特征。HL-2A 上的 PCI 诊断参数如下: 光源为波长 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光, 束流直径为 2.0mm , 输出模式为连续光; 激光经过凹面镜与离轴抛物面镜后实现扩束, 进入真空室的光束直径为 30mm , 覆盖等离子体区域为归一化半径 $0.625 < r/a < 0.7$; 相位板直径 30mm , 中心聚焦光斑直径为 $560\mu\text{m}$, 相位板凹槽宽度 $880\mu\text{m}$, 镀金膜厚度为 $1.325\mu\text{m}$; 成像光路物面为等离子体外中平面, 放大倍数为 0.3 ; HgCdTe 探测器阵列被用来接收激光, 工作于 70K 的低温环境, 一共 32 道呈线性排列, 探测器单元间距为 0.25mm , 单元大小为 $0.2 \times 1.0\text{mm}$, 探测器时间响应高于 2s , 前置放大器带宽达到 5MHz 。整个 PCI 系统的波数测量范围为 $2\text{cm}^{-1} \sim 15\text{cm}^{-1}$, 带宽高于 500kHz , 归一化波数测量范围为 $0.2 \sim 3$ 。该诊断是国内首次在大中型托卡马克上完成的 PCI 系统, 在 2018 年首次参加 HL-2A 实验就获得了成功, 观察到了丰富的物理现象。H 模下的波数谱表明湍流能量主要集中在大尺度结构, 湍流能量的反向级联过程可能是触发 L-H 转的直接原因。HL-2A 的高比压实验发现, 低比压下的湍流较强, 旋转速度较弱, 伴随频率为 $\sim 50\text{kHz}$ 的准相干模; 进入高比压后湍流扰动水平得到抑制, 极向旋转增强, 准相干模消失, 高频湍流波数谱的峰值增大, 即小尺度结构增多。

关键词: 相衬成像, 密度涨落诊断, 波数谱, 高比压

致谢: 国家磁约束聚变能源研究专项 (NO. 2015GB120002), 国家重点研发专项 (NO. 2017YFE0300405), 国家自然科学基金 (11875124)

EAST 托卡马克上基于中子能谱诊断的快离子物理研究

张一镆^a, 葛理健^a, 胡志猛^{d,e}, 孙嘉琪^a, 彭星宇^{a,b}, 杜腾飞^{a,b}, 陈忠靖^{a,b},
张兴^{a,b}, 袁熙^{a,b}, 樊铁栓^{a,*}, 李湘庆^a, 钟国强^c, 胡立群^c, 万宝年^c,

Giuseppe Gorini^{d,e}, Massimo Nocente^{d,e}, M. Tardocchi^{d,e}

^a 北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

^b 中国工程物理研究院, 绵阳 621900

^c 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

^d Dipartimento di Fisica 'G. Occhialini', Università degli Studi di Milano-Bicocca, Italy 20126

^e Istituto di Fisica del Plasma "P. Caldirola", Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy 20125

Email*: tsfan@pku.edu.cn

摘要: 中子作为聚变反应的主要产物, 其相关等离子体诊断研究对于现有的等离子装置以及未来的大型聚变装置(如 ITER、CFETR、DEMO 等)的输出功率评估、燃料离子比例监控、燃烧等离子物理及聚变堆的运行及控制等具有不可替代的重要作用。针对现阶段我国最主要的磁约束聚变装置 EAST 托卡马克, 课题组团队建立了以诊断强化型双环阵列式中子飞行时间谱仪 TOFED (Time-of-Flight Advanced Diagnostic) 为主, 辅以紧凑型有机闪烁体中子能谱仪等一系列中子发射能谱 (Neutron Emission Spectroscopy) 诊断系统, 用于开展中性束注入 (NBI) 以及离子回旋共振 (ICRH) 等辅助加热条件下等离子体中快离子物理等领域的研究。经过基于 GEANT4 以及 MCNP 等程序的谱仪系统优化设计并结合静电加速器准单能中子源的刻度, 对全部中子谱仪进行了可靠的中子输运分析及中子响应模型搭建, 开发了基于高速数字采集卡的全数字化数据采集系统, 可以满足高计数率下运行以及全方位物理信息存储、分析和处理的需求, 目前所有谱仪均已正常运行并投入到 EAST 实验中。针对 TOFED 中子谱仪双环式的特殊设计, 课题组首次提出了动态双能量阈值选择算法并在实验上验证了该算法的可靠性, 由此可以筛掉绝大部分随机符合事件同时将中子飞行时间谱高能端由于多次散射造成的本底水平降低了一个量级。基于 NUBEAM 与 GENESIS 两种程序建立了模拟 EAST 中性束注入加热模式下快离子速度分布函数及中子发射能谱的理论模型, TOFED 中子谱仪与紧凑型有机闪烁体谱仪结合已得到 NBI 加热模式下与该理论模型取得一致的实验结果, 实现了基于中子能谱仪的 EAST 快离子联合诊断。最后, 本工作对于未来将在 EAST 进行的高参数、高功率和长脉冲放电模式下的快离子速度分布进行了初步的理论预演, 讨论在高功率谐波加热与中性束注入的协同加热条件下高中子产额的 D-D 聚变等离子体中基于中子能谱诊断的快离子物理研究。

关键词: EAST 托卡马克 中子能谱诊断 中子飞行时间谱仪 TOFED 有机闪烁体中子谱仪 快离子物理

参考文献

- 【1】 Zhang *et al*, Diagnosing NB plasmas on the EAST tokamak with new time-of-flight neutron spectrometer, *Nucl. Fusion* 2014, 54, 104008
- 【2】 Peng *et al*, Measurement and simulation of the response function of time of flight enhanced diagnostics neutron spectrometer for beam ion studies at EAST tokamak, *Rev. Sci. Instrum.* 2016, 87, 11D836
- 【3】 Chen *et al*, Simulation of neutron emission spectra from neutral beam-heated plasmas in the EAST tokamak, *Nucl. Fusion* 2013, 53, 063023
- 【4】 Peng *et al*, Application of a BC501A Liquid Scintillation Detector with a Gain Stabilization System on the EAST Tokamak, *Plasma Sci. Technol.* 2016, 18, 23
- 【5】 Ge *et al*, Neutron emission spectroscopy measurements with a compact liquid scintillation detector for NBI-heated plasma at EAST, *Plasma Phys. Control. Fusion* 2018, 60, 095004

基金项目： 国家磁约束聚变能专项（批准号：2013GB106004，2012GB101003，2009GB107001，2008CB717803）、国家自然科学基金重大项目（批准号：11790324，91226102）、国家重点研发计划（编号：2016YY0200804，2017YFF0206205）

激光惯性约束聚变诊断技术进展

王峰、李三伟、杨冬、李志超、郭亮、谢旭飞、况龙钰、曹柱荣、胡昕、侯立飞、易荣清、蒲昱东、黄天暄、缪文勇、陈伯伦、晏骥、张兴、陈忠靖、陈家斌、唐琦、蒋小华、宋天明、彭晓世、徐涛、理玉龙、刘慎业、杨家敏、江少恩、张保汉

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900

*Email: lfrc_wangfeng@163.com

摘要: 基于大型激光装置的诊断技术可以为物理模型的分析 and 校验提供“手段”, 为新现象的发现提供“眼睛”。中物院激光聚变研究中心已经在神光系列装置上开展了多年的激光惯性约束聚变研究(ICF), 取得了大量具有国际先进水平的研究结果, 并发展了一系列达到国际先进技术水平的诊断技术。本报告将首先分析美国 NIF 装置上比较典型的诊断技术, 并对技术产生的背景和局限性进行分析。之后, 将介绍我国发展的比较有特色的新型 X 光分幅技术、多狭缝 X 光条纹技术、局域辐射流诊断技术、三维速度干涉仪技术、高分辨时空分辨技术等。针对“单视线技术”, 提出目前几个并行的研究方向, 并对其进展和趋势进行分析。同时, 对时间漂移技术、变锥面弯晶技术以及超快时间扫描技术进行介绍。针对目前和未来的物理需求, 本报告将对一些比较典型的技术进行思考, 并提出我们自己的解决办法。

关键词: 惯性约束聚变, 诊断技术, 单视线, 冲击波

- [1] Jiang Shaoen, Wang Feng*, Ding Yongkun *et al.*, Experimental progress of inertial confinement fusion based at the ShenGuang-III laser facility in China, *Nuclear Fusion*, 2019.1.15, 59(03): 032006

ICF 内爆减速阶段低阶不对称性理论模型

范征锋、张存波、于承新、杨宸、肖德龙、刘杰

北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

Email: fan_zhengfeng@iapcm.ac.cn

摘要: 低阶模驱动不对称性是美国 LLNL 实验室国家点火装置 (NIF) 上内爆实验聚变产额降低的主要因素之一。在本报告中, 我们提出一个描述靶丸内爆减速阶段低阶模不对称性的理论模型, 这个理论模型把靶丸壳层看成是由若干径向运动的分片组成, 同时把热斑状态看成是均匀分布的。该模型通过 LARED-S 程序进行了验证, 可以用来评估驱动不对称性对靶丸性能的降低。对 P2 扰动模的研究表明, 内爆不对称性可以分解为壳层质量的不对称性、壳层速度的不对称性和靶丸半径的不对称性, 并且壳层速度不对称性和靶丸半径不对称性对阻滞阶段靶丸变形及内爆性能的影响比壳层质量不对称性更为显著。不论是哪种因素的不对称性, 靶丸性能降低的主要因素都是由于壳层残余能量增加导致了热斑内能/压力的降低。

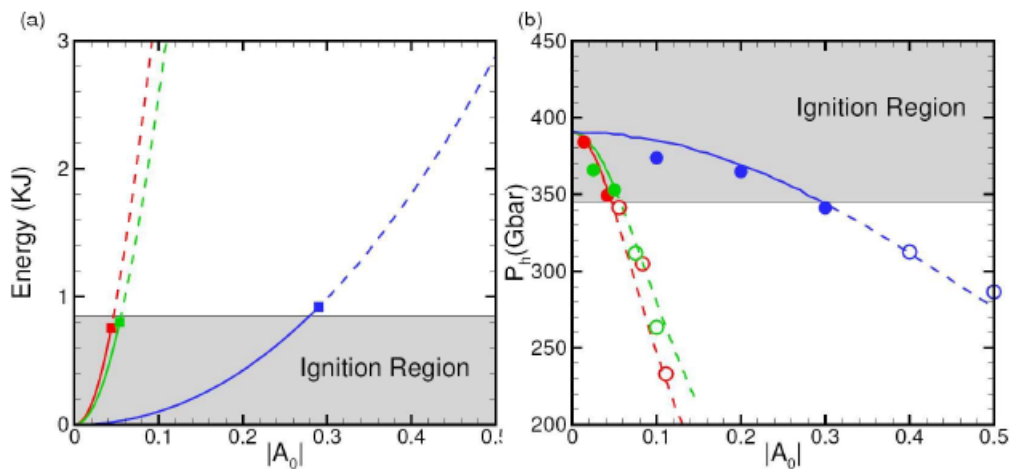


图 1 壳层残余动能 (左图) 及热斑阻滞时刻压力 (右图) 随不对称性幅度的变化

关键词: 惯性约束聚变 内爆 减速阶段 低阶模不对称性 点火悬崖

参考文献

- [1] C. B. Zhang *et al.*, A theoretical model for low-mode asymmetries in ICF implosions, *Phys. Plasmas* 2019, 26, 022707.

基于皮秒拍瓦激光的高分辨 X 射线点投影背光照相实验研究

周维民、单连强、吴玉迟、辛建婷、田超、于明海、张天奎、储根柏、税敏、

曹磊峰、谷渝秋、张保汉

中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900

Email: zhouwm@caep.cn

摘要:

基于皮秒拍瓦激光与微丝靶相互作用产生的高能 X 射线源具有强度高、脉宽窄、焦点小的特点, 利用这种 X 射线源发展出来的高分辨 X 射线点投影背光照相是惯性约束聚变等高能密度物理的重要诊断技术, 美国在国家点火装置上建造先进照相激光束最主要的就是为了满足点火条件下靶丸诊断的需求, 获得燃料压缩密度、面密度分布。

中物院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室的高能激光 X 射线照相团队利用星光 III、神光 II 升级等皮秒拍瓦激光装置发展了高分辨 X 射线点投影背光照相技术。在星光 III 激光装置上, 利用金微丝靶与皮秒拍瓦激光束相互作用产生了微焦点短脉冲 X 射线源, 并对 X 射线背光的光谱、转换效率和源尺寸进行了实验研究, 演示了静态照相技术。在神光 II 升级激光装置上, 利用皮秒激光产生的微焦点 X 射线源对惯性约束聚变靶压缩燃料和冲击加载材料微喷开展了点投影背光照相实验研究, 成功地获得了惯性约束聚变内爆过程和冲击加载材料微喷过程的演化图像。

关键词: 皮秒拍瓦激光 X 射线 点投影 背光照相

基于时间和温度的 ICF 黑腔反照率实验探测研究

任宽¹、任国利²、杜华冰¹、黄运宝³、景龙飞¹、王鹏¹、袁铮¹、黎宇坤¹、
理玉龙¹、叶青¹、詹夏雨¹、侯立飞¹、于瑞珍¹、王鹏¹、李志超¹、李三伟¹、
曹莉华²、傅立斌⁴、黄天暄¹、杨冬¹、杨家敏¹、王峰¹、丁永坤^{2,5}、刘杰^{2,5}、

江少恩^{1,5}

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

3. 广东工业大学机电学院, 广州 510080

4. 北京计算科学研究中心, 北京 100193

5. 北京大学 MoE 的 CAPT, HEDPS, IFSA 联合创新中心, 北京 100871

Email: liu_jie@iapcm.ac.cn; jiangshn@vip.sina.com

摘要: 在间接驱动惯性约束聚变中, 黑腔壁的反照率是影响黑腔驱动对称性最重要的参数之一。然而到目前为止, 在整个激光驱动过程中, 随时间和温度变化的黑腔壁反照率尚没有通过实验测量获得。本课题组团队通过采用两台空间分辨辐射流探测设备分别测量黑腔中光斑区和再发射壁区辐射流, 并结合所提出的基于视因子的入射辐射流折算方法以及自洽迭代提取方法, 首次给出了 1.5ns 驱动激光脉冲过程中充气黑腔 0.6-1.2ns 及 149-177eV 时间及温度范围黑腔壁反照率。结合实验观测和理论模拟, 我们将这个避免了充气及等离子体填充影响的反照率确定为黑腔壁反照率的准确值。通过与前人工作的对比分析研究, 发现反照率其实是一个包含黑腔的时间、能量积累过程的整体宏观工程参数 (不能只是简单地从辐射流进出黑腔壁定义去理解, 要从黑腔宏观整体辐射场角度理解), 这个参数同时会影响原子分子微观建模, 它是反映黑腔保温性能最主要的参数。而且我们获取时、温变反照率的方法是一个既包含特殊平衡态 (黑腔辐射场) 又包含一般非平衡态下反照率获取的方法, 这一方法以及相关结果与发现对于黑腔能量学的发展具有非常重要的意义。

关键词: 间接驱动惯性约束聚变 时、温变反照率 保温性能 非平衡态 黑腔能量学

基于等离子体通道的新型尾场级联加速和受控辐射方案

罗辑、祝昕哲、陈民、盛政明、张杰

上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

Email: logicbuaa@gmail.com; minchen@sjtu.edu.cn;

摘要: 超短超强激光在气体等离子中可以激发出大振幅的等离子体波, 可以承载比传统射频加速器高出 1000 倍的加速电场, 有望成为下一代粒子对撞机和辐射源的加速机制, 在世界范围内被广泛研究。利用放电等离子体通道对超短超强激光导引可以克服激光自然散焦的特性, 在激光尾波加速中已被广泛应用。为了避免长距离加速后电子到达失相点的影响, 一种行之有效的办法是使用级联加速。现有的级联方案使用等离子体镜将后续激光脉冲馈送到下级, 同时使用等离子体透镜控制电子束聚焦和导引。

本报告中, 我们将提出一种更紧凑和有效的方案, 利用弯曲等离子体通道对光脉冲进行导引, 从而实现一种新型的激光尾场加速级联方式, 将电子束和激光脉冲同时耦合到第二级, 可以克服现有方案中电子束散焦的缺点, 为高能激光尾波加速奠定基础; 同时, 利用偏轴入射激光在通道中的横向振荡, 有望实现受控的尾场振荡, 尾场中的电子束会做受控辐射, 从而实现超紧凑同步辐射, 相关性能指标可以接近甚至超过第三代同步辐射源。

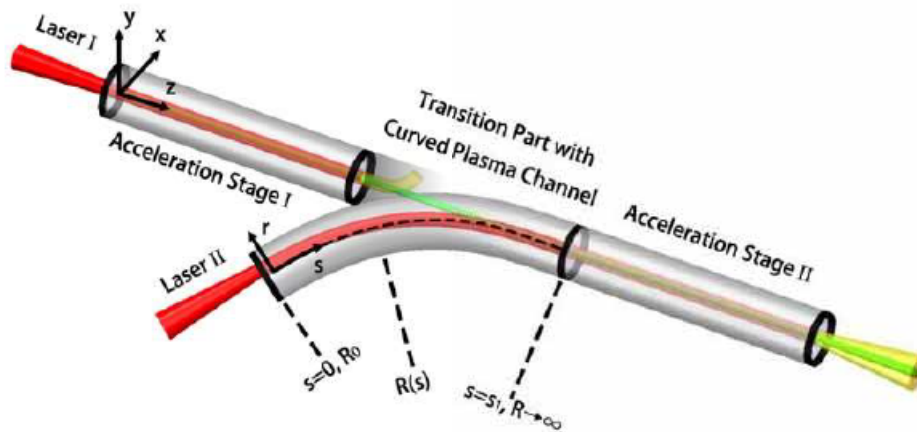


图 1 弯曲等离子体通道耦合的两个 LWFA 加速级示意图

关键词: 超短超强激光 激光尾波加速 级联加速 辐射

参考文献

- 【1】 Luo J, Chen M, Wu W Y, et al. Multistage Coupling of Laser-Wakefield Accelerators with Curved Plasma Channel[J].Physical Review Letters, 2017, 120(15):154801.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11774227, 11721091)

High coupling efficiency of foam spherical hohlraum driven by 2ω laser light

Yao-Hua Chen¹, Ke Lan¹, Wanguo Zheng², and E. M. Campbell³

¹Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, China

²Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, China ³Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, NY, USA

Abstract: The majority of solid state laser facilities built for laser fusion research irradiate targets with third harmonic light ($0.35\ \mu\text{m}$) up-converted from the fundamental Nd wavelength at $1.05\ \mu\text{m}$. The motivation for this choice of wavelength is improved laser-plasma coupling. Significant disadvantages to this choice of wavelength are the reduced damage threshold of optical components and the efficiency of energy conversion to third harmonic light. Both these issues are significantly improved if second harmonic ($0.53\ \mu\text{m}$) radiation is used but theory and experiments have shown lower optical to X-ray energy conversion efficiency and increased levels of laser-plasma instabilities resulting in reduced laser-target coupling. we propose to use the $0.53\ \mu\text{m}$ laser for future ignition facilities with a configuration designed for the octahedral spherical hohlraums, and to use a foam wall to increase the coupling efficiency from the laser to the capsule. The 2-dimensional radiation-hydrodynamic code LARED-Integration is employed to simulate and compare the coupling efficiency between the Au foam and the solid Au spherical hohlraums driven by, respectively, the $0.53\ \mu\text{m}$ and the $0.35\ \mu\text{m}$ laser. The simulations show that the reduced optical depth of the foam wall leads to an increased laser-light conversion into thermal X-ray and about 10% higher radiation flux on the capsule than that achieved with $0.35\ \mu\text{m}$ laser irradiating a solid density wall commonly used in laser indirect drive fusion research. A new concept, effective laser to X-ray conversion efficiency, is defined. For laser fusion, this new concept is more accurate in describing the coupling efficiency from laser to capsule than the traditional definition of laser to X-ray conversion efficiency, because most part of the generated X-rays is stored inside the wall instead of transferring into hohlraum cavity to irradiate capsule.

Keywords: Coupling efficiency, Spherical hohlraum, 2ω laser light

Superthermal electron generation by two-stage acceleration of backward and forward stimulated Raman scattering in high electron density region

Q. S. Feng¹, L. H. Cao¹, Z. J. Liu¹, C. Y. Zheng¹, and X. T. He^{1,2}

¹ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, China

² Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing, China

e-mail (speaker): qingsong_feng@foxmail.com

摘要: The mechanism of two-stage electron acceleration by backward stimulated Raman scattering (BSRS) and forward stimulated Raman scattering (FSRS) is demonstrated through relativistic Vlasov-Maxwell simulation. The theoretical model is given to judge the condition of two-stage electron acceleration. The electrons trapped by BSRS inducing Langmuir wave (LW) will be trapped and accelerated by FSRS LW directly in the high electron density region. The superthermal electrons with energy larger than the energy at the phase velocity of FSRS LW will be generated by two-stage acceleration. In the condition of $T_e=2.5\text{keV}$, only when $n_e>0.138n_c$, can the electrons trapped by BSRS LW be accelerated by the FSRS LW directly. And the optimal parameter region is $0.108n_c < n_e < 0.128n_c$ in condition of $T_e=2.5\text{keV}$ to control BSRS and superthermal electrons to a low level.

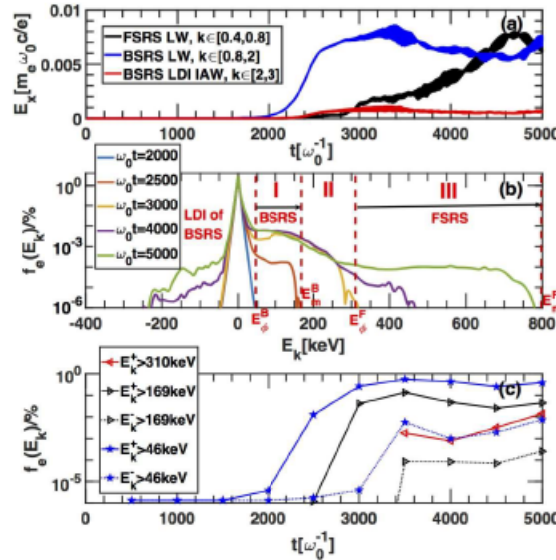


Figure 1 (a) The time evolution of LW of FSRS, LW of BSRS and IAW of LDI of BSRS. (b) The distribution of electron kinetic energy at different time. (c) The ratios of electrons in different energy scope evolution with time.

关键词: 受激拉曼散射、超热电子、惯性约束聚变

参考文献

1. B. J. Winjum, J. E. Fahlen, F. S. Tsung, and W. B. Mori, Phys. Rev. Lett. 110, 165001 (2013).
 2. Q. S. Feng, C. Y. Zheng, Z. J. Liu, L. H. Cao, Q. Wang, C. Z. Xiao, and X. T. He, Physics of Plasmas 25, 092112 (2018).
 3. Q. S. Feng, Z. J. Liu, C. Y. Zheng, C. Z. Xiao, Q. Wang, H. C. Zhang, L. H. Cao, and X. T. He, Plasma Physics and Controlled Fusion 59, 075007 (2017).
 4. Q. S. Feng, L. H. Cao, Z. J. Liu, C. Y. Zheng, and X. T. He, Superthermal electron generation by two-stage acceleration of backward and forward stimulated Raman scattering in high electron density region, submitted.
- 基金项目:** “博士后创新人才支持计划” (No. BX20180055), 博士后面上基金 (2018M641274), 国家自然科学基金项目 (NO. 11875091, 11575035, 11475030, 11875093 and 11435011), 973 项目 (No. 2013CB834101), 科学挑战计划 (No. TZ2016005) .

托卡马克中多成分等离子体的回旋动理学模拟

肖湧

浙江大学, 杭州 310058

Email: yxiao@zju.edu.cn

摘要: 托卡马克等离子体一般含有多种成分, 包括热离子、电子和杂质离子以及核聚变或者外部加热产生的高能粒子; 每种成分都可能激发危险的低频不稳定性从而造成破化装置约束性能的湍流输运。我们开发基于回旋动理学的大规模物理模拟程序, 联合使用本征值和初值两种方法研究多成分聚变等离子体中的低频不稳定性和由此引起的湍流输运, 目前模拟结果主要包含高能粒子激发的漂移阿尔芬波程序, 以及包含杂质离子的静电漂移波湍流。我们自主开发的 DAEPS 程序 (漂移阿尔芬波高能粒子稳定性程序), 是为了研究托卡马克等离子体中漂移性阿尔芬波不稳定性的激发机制而开发的一个线性非微扰本征值程序。DAEPS 程序包含了环形等离子体的径向不均匀性、压力的各向异性、磁力线弯曲效应、有限拉摩轨道半径效应、波粒子共振效应等关键物理, 能够弥补理论中的因尺度分离假设和渐近匹配所造成的不准确性, 通过自洽计算获得准确不稳定模的模结构渐近行为, 以及更为精确的线性增长率和实频; 为模拟解释实验提供有力的工具。作为程序验证实例, 我们利用 DAEPS 代码研究了包含热离子动理学压缩效应的 BAE/KBM 等电磁模和高能粒子激发环阿尔芬本征模以及高能捕获粒子激发 α TAE 模等物理, 并得到了这些模的频率与增长率以及模结构的渐近行为。此外, 我们基于 GTC 模拟平台自主开发了杂质离子模拟模块。我们在程序上对杂质离子和热离子进行对称处理, 使之能处理关键的带状流物理以及各种波长的漂移波不稳定性与湍流输运。现在的实验参数下模拟发现负梯度下杂质离子对湍流存在阻尼作用, 而正梯度下杂质离子则对湍流具有激发作用。多成分等离子体的回旋动理学模拟为模拟解释实验和模拟预测实验提供进一步的可能。

关键词: 回旋动理学模拟、漂移波、阿尔芬波、湍流输运

基金项目: 国家磁约束聚变能发展专项 (No. 2015GB110003) 和国家自然科学基金项目 (NO. 11575158)

Electromagnetic turbulence driven intrinsic current in tokamak plasmas

Wen He¹, Lu Wang^{1*}, Shuitao Peng¹, Weixin Guo¹ and Ge Zhuang²

¹International Joint Research Laboratory of Magnetic Confinement Fusion and Plasma Physics, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

²Department of Engineering and Applied Physics School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, People's Republic of China

Email address of presenting author: luwang@hust.edu.cn

The mean parallel current density evolution equation is presented using the electromagnetic (EM) gyrokinetic equation [1]. The ratio of intrinsic current density driven by EM electron temperature gradient turbulence to the background bootstrap current density is estimated. The intrinsic current density driven by the residual turbulent source is negligible as compared to that driven by the residual turbulent flux. The local intrinsic current density driven by the residual turbulent flux for mesoscale variation of turbulent flux can reach about 80% of the bootstrap current density in the core region of an ITER standard scenario, but there is no net intrinsic current on a global scale. The local intrinsic parallel current density driven by electron drift wave (DW) turbulence in pedestal region including electromagnetic (EM) effects is also investigated [2].

References:

- [1] Wen He, Lu Wang*, Shuitao Peng, Weixin Guo and Ge Zhuang, Nucl. Fusion 58 106004 (2018).
- [2] Wen He, Lu Wang* and Ge Zhuang, submitted to PPCF, 2019.

Key words: intrinsic current density, electromagnetic effects, turbulent flux, turbulent source

This work was supported by the National Key R&D Program of China under Grant No. 2017YFE0302000, the NSFC Grant Nos. 11675059 and 11305071.

碰撞效应对 H 模等离子体中边界负径向电场形成的影响

吴国将, 张晓东, 李亚东, 孙鹏军, 李磐, 耿靖森

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

Email: gjwu@ipp.ac.cn

摘要: 在先前的研究中基于离子轨道损失模型我们发现了托卡马克边界负径向电场的分叉现象, 这种分叉现象为 L-H 模转换过程中负径向电场的形成机制提供了一个可能解释, 包括它的阈值功率、转换时间、同位素效应、边界 H 模宽度等等。但是这种模型更多考虑的是无碰撞的离子轨道损失, 当考虑碰撞效应时, 碰撞和径向电场的存在会使带点粒子沿径向产生额外的粒子流, 电子会沿着电场方向移动而离子会逆着电场方向移动, 这样在径向电场方向就会产生一个径向电流 j_{Er} 。模拟发现平均离子损失速度远远大于径向电流的流速, 因此这个径向电流的存在, 并不会阻止负径向电场的形成, 但是它总是试图去消除或者抹平已存的径向电场, 这种机制的存在会使得等离子体中的径向电场处于一种动态的变化过程。在一定磁场位型下, 径向电流受等离子体温度、密度、径向电场值和电场的剪切等因素的影响, 因此 H 模等离子体所能形成的径向电场的大小也受这些因素的影响, 只有当等离子体的温度超过一定的临界值 T_{is} 和密度第一定的临界值 n_{is} 时, 一个强的负径向电场才能够形成。在模拟过程中也分析了离子与中性气压效应对负径向电场形成的影响, 发现当边界区域存在较高的中性气体时, j_{Er} 会变得更而所能形成的负径向电场值会变得更小, 这样就会使得在中性气压过高时 H 模不容易实现, 因此要想形成较强的负径向电场来触发 L-H 模转换就需要有更好的壁条件和降低粒子再循环。

参考文献

- 【1】G. J. Wu, X. D. Zhang, Y. D. Li, et al. Fast generation of an inward electric field due to ion orbit losses in the tokamak edge plasma during transition from low-to-high confinement. 2014 Nucl. Fusion **54**:083030.

Theoretical study of helium ash transport driven by micro-turbulence in tokamak plasmas

Weixin Guo, Lu Wang and Ge Zhuang

International Joint Research Laboratory of Magnetic Confinement Fusion and Plasma Physics,
State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of
Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

Email address of presenting author: wxguo@hust.edu.cn

We have studied the removal of helium ash from deuterium (D) and tritium (T) plasmas driven by ion temperature gradient (ITG) turbulence [1] and parallel velocity shear (PVS) turbulence [2], respectively. The main results can be presented as:

1. The normalized impurity flux $\hat{\Gamma}_z$ is outward when the density profile of helium ash is steeper than that of electron, i.e., $R/L_{nz} \geq R/L_{ne}$. Here, R is the major radius, L_{nz} (L_{ne}) is the impurity (electron) density gradient scale length.
2. Outward $\hat{\Gamma}_z$ is reduced by increasing temperature ratio between electron and impurity (T_e/T_z). It indicates that the efficiency of expelling helium ash through both ITG and PVS turbulence might become worse with the slowing down process of energetic alpha particles.
3. Isotopic effects, i.e., increasing the effective hydrogen ion mass number $A_{i,eff}$, are unfavorable (favorable) for expelling helium ash through ITG (PVS) turbulence.
4. Increasing normalized PVS ($\overline{\sigma}'_{\parallel}$) is favorable for expelling helium ash through PVS turbulence.

Moreover, we also studied the impurity effects on zonal flow (ZF) in D-T plasma based on the gyrokinetic theory [3, 4]. It is found that higher temperature helium ash increases the growth rate of ZF driven by collisionless trapped electron mode (CTEM) turbulence, and this may bring good news for the improvement of plasma confinement.

These analytical works provide a meritorious theoretical foundation for understanding the effects of helium ash on ITER confinement and the removal of helium ash in future burning plasmas.

References:

- [1] Guo Weixin, Wang Lu and Zhuang Ge 2016 Phys. Plasmas **23** 112301.
- [2] Guo Weixin, Wang Lu and Zhuang Ge 2019 Nucl. Fusion **59** 076012.
- [3] Guo Weixin, Wang Lu and Zhuang Ge 2017 Nucl. Fusion **57** 056012.
- [4] Guo Weixin, Wang Lu and Zhuang Ge 2017 Nucl. Fusion **57** 126052.

漂移撕裂模的数值模拟

时浩、张文祿

中国科学技术大学，合肥 230026

Email: shihao@mail.ustc.edu.cn

摘要：撕裂模是托卡马克装置中最危险的磁流体不稳定模式之一，本工作基于 GTC 程序主要研究了柱位形下抗磁漂移运动对经典电阻撕裂模的影响，即漂移撕裂模。首先，我们使用流体模型模拟研究了柱位形下的 ($m=2, n=1$) 电阻撕裂模，得到了电阻撕裂模的增长率随等离子体 β 值的变化关系并与理论推导的结果定性上一致。然后，我们引入了平衡压强梯度的影响，于是得到了漂移撕裂模。模拟结果显示，抗磁漂移运动使原本实频率为零的电阻撕裂模出现了一个约等于电子抗磁漂移频率的实频率，并且使模的增长率显著降低。另外，我们还验证了漂移撕裂模的增长率与抗磁漂移频率的定标关系，模拟结果显示当等离子体电阻率较低时，模拟与理论结果吻合的较好；而当电阻率较高时，模拟与理论结果出现一定的偏差。

关键词：漂移撕裂模 电阻率 色散关系

基金项目：国家自然科学基金项目 (NO. 11675256) 等

甚高频容性放电中非线性驻波效应

刘永新, 赵凯, 温德奇, M. A. Lieberman, D. J. Economou, 王友年

大连理工大学物理学院, 大连 116024

*Email: yxliu129@dlut.edu.cn

摘要: 甚高频大面积容性耦合等离子体 (CCP) 在半导体工艺中备受青睐。然而, 当放电腔室的尺寸与等离子体中电磁波的波长相当时, 驻波效应将破坏等离子体的均匀性, 限制了大面积腔室和甚高频电源的使用。因此, 非常有必要对驻波效应的物理本源及等离子体均匀性进行研究。

首先, 我们研制了一种可调谐补偿型射频磁探针, 利用差模信号与共模信号的等效电路模型, 计算了磁探针的输出特性。此外, 还采用亥姆霍兹线圈和法拉第杯分别对模型的计算结果进行了实验验证。结果表明, 通过调节电路中的两个可变电容, 磁探针的磁感应信号可以得到放大, 且容性干扰信号可以得到有效抑制, 即实现了最佳的信噪比。

首次在实验上观察到由高次谐波引起的驻波效应。为了研究高次谐波激发对等离子体均匀性的影响, 实验中采用高频磁探针对谐波磁场的空间分布进行了测量, 并利用悬浮双探针来测量等离子体密度的径向分布。实验测量的谐波磁场分布与非线性电磁模型得到的结果吻合的很好, 通过该模型的计算结果还可以揭示非线性驻波形成的深层次物理机制。随着气压升高, 高次谐波激发逐渐受到抑制, 等离子体均匀性得到改善。

为了提高等离子体均匀性, 我们施加了另一个低频源, 考察了低频电压和低频频率对甚高频容性放电的均匀性的影响。发现当双频源同时施加到一个电极上时, 通过调节低频电压或低频频率可以对等离子体的径向均匀性进行优化。

关键词: 容性耦合等离子体; 甚高频; 非线性驻波; 均匀性; 磁探针

参考文献

- [1] Kai Zhao, Yong-Xin Liu, De-Qi Wen, Demetre J. Economou, and You-Nian Wang. A new B-dot probe circuit for magnetic diagnostics of radio frequency discharges. *Rev. Sci. Instrum.* (2018) 89, 105104
- [2] Kai Zhao, De-Qi Wen, Yong-Xin Liu, Michael A. Lieberman, Demetre J. Economou, and You-Nian Wang, Observation of Nonlinear Standing Waves Excited by Plasma-Series-Resonance-Enhanced Harmonics in Capacitive Discharges, *Phys. Rev. Lett.* (2019) 122, 185002
- [3] Kai Zhao, Yong-Xin Liu, E Kawamura, De-Qi Wen, M A Lieberman and You-Nian Wang. Experimental investigation of standing wave effect in dual-frequency capacitively coupled argon discharges: role of a low-frequency source. *Plasma Sources Sci. Technol.*, (2018) 27, 055017

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11405018, 11722541 和 11335004)

二维尘埃等离子体基板动力学

冯岩*、李威、王康、黄栋

苏州大学物理科学与技术学院, 江苏省苏州市 215006

*Email: fengyan@suda.edu.cn

摘要: 近二十年来, 尘埃等离子体群体性行为已被大量研究, 但都集中在无外加势场下的群体性行为。在其他学科分支, 例如胶体系统, 基板被广泛引入其动力学行为的研究之中, 而发现了一系列新奇的现象和动力学行为, 例如结构相变、脱钉行为等等。这里通过郎之万动力学数值模拟, 我们系统地研究了一系列二维尘埃等离子体在一维周期基板下的动力学行为。首先, 就这一系统下波动传输行为【1】, 研究发现垂直于一维基板方向的波动传输被抑制, 而沿着一维基板沟槽内, 纵波传输完全主导。随着基板强度变小或者宽度变大, 尘埃颗粒呈现锯齿排布, 声子谱出现分叉行为, 一支对应于整体的晃动模式, 而另一支则对应于相对运动的呼吸模式。另外, 还发现由于尘埃颗粒之间的纯排斥相互作用导致了晃动模式的波动向后传播的行为。其次, 就系统的结构发现, 随着基板强度的逐渐提升, 沟槽内部颗粒排布的有序度呈现先逐步增加至最高, 再降低的一个过程【2】。开始有序度的增加应该是由颗粒间相互作用与颗粒基板间相互作用竞争所致, 随后有序度的降低应该是由维度减小导致涨落增加所致。对沟槽内扩散行为的均方位移研究发现, 在起始的弹道行为和最终的扩散行为之间, 有一段明显的亚扩散行为, 应该是由基板诱导的笼运动行为的扭曲所导致【2】。最后, 我们对基板存在条件下的二维尘埃等离子体的脱钉动力学进行了研究, 当所有尘埃颗粒所受恒定外力从零逐渐增大时, 众多结构和动力学诊断手段均显示系统呈现三个态, 即钉住态、无序塑性流态和有序平移态【3】。

关键词: 尘埃等离子体、基板动力学、声子谱、亚扩散、涨落、脱钉、塑性流

参考文献

- 【1】 W. Li, D. Huang, K. Wang, C. Reichhardt, C. J. O. Reichhardt, M. S. Murillo, and Yan Feng*, Phonon spectra of two-dimensional liquid dusty plasmas on a one-dimensional periodic substrate, *Phys. Rev. E* 2018, 98, 063203.
- 【2】 K. Wang, W. Li, D. Huang, C. Reichhardt, C. J. O. Reichhardt, M. S. Murillo, and Yan Feng*, Structures and diffusion of two-dimensional dusty plasmas on one-dimensional periodic substrates, *Phys. Rev. E* 2018, 98, 063204.
- 【3】 W. Li, K. Wang, C. Reichhardt, C. J. O. Reichhardt, M. S. Murillo, and Yan Feng*, Depinning dynamics of two-dimensional dusty plasmas on a one-dimensional periodic substrate, *Phys. Rev. E* submitted.

致谢: 国家自然科学基金项目 (Nos. 11875199 & 11505124); 中组部青年千人启动基金; 苏州大学科研启动基金等

太阳耀斑电流片中的蝌蚪状流动(Supra-arcade downflows)

田晖、Tanmoy Samanta、谭光钰

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

Email: huitian@pku.edu.cn

摘要: 耀斑表现为太阳电磁辐射在几分钟到几个小时的时间尺度上急剧增强。磁重联是耀斑能量释放的主要机制。耀斑发生时, 日冕中通常会出现一个大尺度的电流片。约 20 年前, 日本 Yohkoh 卫星上的 SXT 望远镜和美国 TRACE 卫星发现, 在耀斑电磁辐射逐渐减弱的阶段, 该电流片中通常会出现一些朝向太阳运动的蝌蚪状流动, 称 Supra-arcade downflows (SADs)。开始 SADs 出现在光球之上 100-200 Mm, 往下运动 20-50 Mm 后到达耀斑环顶附近消失, 速度多在 50-500 km/s。SADs 在软 X 射线和极紫外波段的辐射比周围弱, 可能是因为密度较低。自发现后, SADs 受到了磁重联和耀斑研究学者的广泛关注。然而其本质仍有大量争议, 具体的产生机制也还不清楚, SADs 与周围等离子体以及耀斑环顶的相互作用也很少有研究。利用太阳动力学天文台卫星(SDO)的高分辨率观测, 我们发现在一个电流片中, SADs 触发了一个上传的波状结构, 其上传速度(约 20 km/s)远小于日冕中磁流体力学波的传播速度。经计算, Strouhal 数为 0.2 左右, 这与涡脱落理论预期完全一致, 表明在太阳大气这种磁流体环境中, 涡脱落现象也是可能存在的。在另一个电流片中, 我们观测到了 SADs 与耀斑环顶碰撞后导致耀斑环加热的明确证据。间歇性的碰撞也导致了总的极紫外和软 X 射线辐射流量准周期性地发生变化, 因此我们的观测也为耀斑准周期脉动现象提供了一种新的解释。基于这些观测, 我们对 SADs 的本质也进行了讨论。

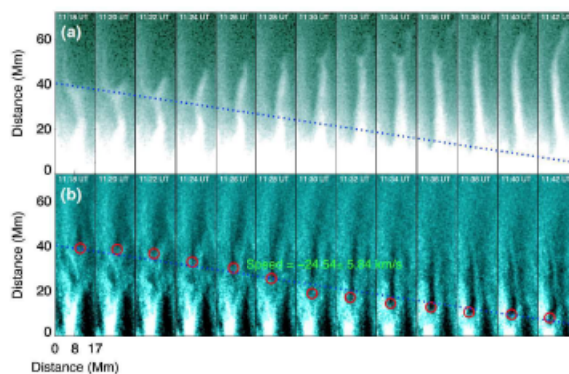


图 1 SADs (b) 触发上传波状结构 (a)

关键词: 太阳耀斑 磁重联

参考文献

- 【1】 T. Samanta, H. Tian, V. M. Nakariakov, Evidence for Vortex Shedding in the Sun's Hot Corona, *Physical Review Letters*, 2019, 123, 035102.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11825301, No. 11790304(11790300), No. 11850410435) 等

地球磁层中准周期性电磁离子回旋波产生机制

刘斯¹、陈伦锦²、高中磊³

¹长沙理工大学物理与电子科学学院, 长沙 410114

²William B. Hanson Center for Space Sciences, Department of Physics, University of Texas at Dallas, Richardson, TX, USA, 75080

³哈尔滨工业大学(深圳)空间科学与应用技术研究院, 深圳 518000

Email: liu.si@hotmail.com

摘要: 电磁离子回旋波(EMIC)是地球磁层中一种常见的电磁波动。研究表明 EMIC 波可以与磁层中的电子和离子发生共振, 导致环电流离子的损失、辐射带电子的散射以及磁层离子的加热等。因此, EMIC 波在磁层动力学研究中扮演相当重要的角色。EMIC 波的不稳定性可由温度各项异性的能量质子 (~10 keV)产生。同时, 由于 EMIC 波激发所需的磁能在地磁场极小值处更小, 而超低频波(ULF)能够导致局地磁场极小值, 更有利于 EMIC 波的产生, 因此 ULF 波对 EMIC 波的调制被认为是准周期性 EMIC 波产生的一种重要机制。

结合太阳风、粒子及波的观测数据, 课题组研究了磁层多尺度任务(MMS)观测到准周期性电磁离子回旋波事件。通过分析太阳风动压的频率特征、磁力线共振频率特征及 EMIC 波包的频率之间的关系, 并计算 EMIC 波的线性增长率, 我们提出准周期性电磁离子回旋波的产生过程可能是有周期性太阳风压缩地球磁层, 引起磁力线振荡, 导致周期性磁场极小值并调制质子的各向异性, 从而调制 EMIC 波的周期性, 并产生 EMIC 波的准周期性结构。

关键词: 地球磁层 EMIC 波 ULF 波 线性增长率

参考文献

【1】 Liu, S., et al. (2019), Magnetospheric Multiscale Observation of Quasiperiodic EMIC Waves Associated With Enhanced Solar Wind Pressure, *Geophysical Research Letters*, 46, 7096–7104.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 41504125, 41974212)

基于卫星平台的无伸杆磁强计简介

肖池阶 (1)、宗秋刚 (1)、于向前 (1)、王永福 (1)、刘斯 (2)

(1) 北京大学物理学院、地球与空间科学学院, 北京 100871

(2) 长沙理工大学物理与电子科学学院, 长沙 410114

Email: cjxiao@pku.edu.cn

摘要: 为了满足研究日地空间等离子体的要求, 基于卫星平台的磁强计在测量空间磁场时一般需要具备高达 1 纳特左右的测量精度。为避免卫星平台及其他载荷的干扰, 通常都是通过伸杆将磁强计放置在卫星平台数米之外。但是伸杆对卫星平台的稳定性、伸杆材料和技术、卫星载荷分布等多方面均有很高要求。因此, 有必要探索在无伸杆条件下星载高精度磁场测量的可行性。无伸杆条件下, 放置在卫星表面的磁强计测到的磁场数据是待测的空间磁场和卫星本底磁场的叠加。进一步分析表明, 卫星本底磁场与空间磁场不同, 它具有近磁源、多点耦合的特性, 磁场梯度较为明显。根据这一特点, 有望基于多点测量, 通过适当的算法将空间磁场和卫星本底磁场区分开, 获得我们需要的空间磁场。本文将介绍基于多点磁场探测数据反演卫星剩磁的理论模拟计算结果, 给出基于卫星平台的无伸杆磁强计研制建议。

关键词: 空间等离子体、磁场测量、无伸杆磁强计

Simulations on the electron dynamics in excitation of
whistler mode waves with Dipole Research EXperiment
(DREX) parameters

黄华

Chorus waves are widely investigated in space physics due to their significant role played in the radiation belts. Multiple structures of chorus frequency chirping elements, such as rising-tone structure, falling-tone structure, hook-like structure, are observed in both space plasmas and the ground simulation experiments. In this paper, the numerical simulation on the generation of falling tone structures of chorus waves with parameters of a launching device, Dipole Research EXperiment (DREX), is conducted by a hybrid code named DAWN. A falling tone structure of chorus waves is self-consistently generated without other additional requirements except a hot electron component as free energy source. A case of rising tone under the magnetosphere parameters is also carried out to verify our simulation. Phase space distribution of electrons for the two chirping structures are analyzed, and the simulation results are consistent with previous theoretical predictions. It is obtained from the simulation results that the rising-tone chorus is observed together with an electron phase space hole (a depleted distribution function), while the falling-tone structure is observed together with an electron phase space clump.

摩擦纳米发电机驱动的等离子体及新型光电传感器件

顾广钦, 程纲*

河南大学, 材料学院, 河南省, 开封市, 475004

摩擦纳米发电机是基于接触起电和静电感应效应的一种新型的能量采集技术, 可以将自然环境和人体运动产生的机械能转化为电能。近年来, 摩擦纳米发电机在能量采集、自驱动传感等领域中引起了人们的广泛专注。

摩擦纳米发电机具有输出电压高的特点, 开路电压达到几千伏特, 可以在空气中使气体电离产生等离子体。我们小组利用摩擦纳米发电机高达上千伏的输出电压, 报道了其在室温条件下对空气分子的电离。另外, 我们报道了摩擦纳米发电机对 O_2 、 CO_2 等不同分子的电离特性, 研究了活性负离子的产生过程和机制。在此基础上, 我们发展出自驱动的紫外光和气体传感器。另外, 我们将摩擦纳米发电机与半导体纳米器件相结合, 构成器件性能的原位调控系统, 利用放电产生的等离子体原位调控器件的性能。

由于摩擦纳米发电机成本低廉、易于加工, 将它与半导体传感器相结合所组成的新型光电传感系统具有成本低、可大规模制备的优点, 可以满足物联网中传感节点数量庞大的实际需求。为发展面向物联网的高性能光电纳米器件提供了新的思路, 具有广阔的应用前景。

关键词: 摩擦纳米发电机、等离子体、气体电离、表面离子栅、光电传感器

参考文献:

1. Lei Zhao, Ke Chen, Feng Yang, Mingli Zheng, Junmeng Guo, Guangqin Gu, Bao Zhang, Huaifang Qin, Gang Cheng*, Zuliang Du*, The novel transistor and photodetector of monolayer MoS_2 based on surface-ionic-gate modulation powered by a triboelectric nanogenerator. *Nano Energy* 2019, 62, 38-45.
 2. Feng Yang, Mingli Zheng, Lei Zhao, Junmeng Guo, Bao Zhang, Guangqin Gu, Gang Cheng*, Zuliang Du*, The high-speed ultraviolet photodetector of ZnO nanowire Schottky barrier based on the triboelectric-nanogenerator-powered surface-ionic-gate. *Nano Energy* 2019, 60, 680-688.
 3. Ke Zhao#, Guangqin Gu#, Youning Zhang, Bao Zhang, Feng Yang, Lei Zhao, Mingli Zheng, Gang Cheng*, Zuliang Du*, The self-powered CO_2 gas sensor based on gas discharge induced by triboelectric nanogenerator. *Nano Energy* 2018, 53, 898-905.
 4. Gang Cheng, Haiwu Zheng, Feng Yang, Lei Zhao, Mingli Zheng, Junjie Yang, Huaifang Qin, Zuliang Du*, Zhonglin Wang*, Managing and Maximizing the Output Power of a Triboelectric Nanogenerator by Controlled Tip-Electrode Air-Discharging and Application for UV Sensing. *Nano Energy* 2018, 44, 208-216.
-

**Strong zonal flow generation due to interaction between TAEs and tearing
modes**

Z. W. Ma^(a), H.W. Zhang, and J. Zhu

Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027,
China

Abstract

Nonlinear interaction between toroidal Alfvén eigenmodes (TAEs) and tearing modes is investigated by using the hybrid code CLT-K. It is found that the $n=1$ TAE is first excited by isotropic energetic particles at the linear stage and reaches the first steady state due to wave-particle interaction. After the saturation of the $n=1$ TAE, the $m/n=2/1$ tearing mode grows continuously and reaches its steady state due to nonlinear mode-mode coupling. It is worth to note that the tearing mode activity can cause strong increase of the $n=0$ zonal component and large decrease of the $n=1$ TAE mode due to redistribution of energetic particles associated with formation of magnetic islands. The generation of the large zonal flow could lead to formation of internal transport barrier near the resonant surface that largely improves the energy confinement in magnetic confinement fusion device or future reactor.

Unstable spectra of the tearing modes in a triple current sheet configuration with sub-Alfvénic shear flows

魏来、王正泓

大连理工大学物理学院, 大连 116024

Email: laiwei@dlut.edu.cn

摘要: Effects of sub-Alfvénic shear flow on the complicated properties of the three types of unstable eigenmodes in a triple current sheet configuration are studied by means of an eigenvalue analysis. As shown in Fig. 1, these unstable eigenmodes can be classified as coupled triple tearing mode (M^1), coupled double tearing mode (M^2) and three single tearing modes (M^3) respectively. It is identified that the velocity difference among three resonant surfaces rather than the flow shear rate plays the more important role in the three types of eigenmodes. Thus, it is found that for the symmetric shear flow (SSF), the growth rate of M^1 / M^3 mode decreases/increases with increasing the strength of the shear flow, while the growth rate of M^2 mode is almost uninfluenced by the shear flow. For the anti-symmetric shear flow (ASF), it is interestingly observed that in the small wavenumber regime, the M^1 and M^2 modes degenerate into the similar eigenmode states with the same growth rate and opposite traveling frequencies, as shown in Fig. 2. However, in the large wavenumber regime, the M^2 and M^3 modes degenerate into the similar eigenmode states. Moreover, for both SSF and ASF, the growth rates of the three types of modes are almost the same in the large wavenumber limit with weak coupling effect among three current sheets.

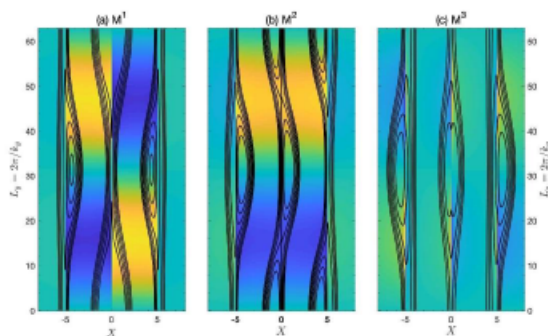


Fig. 1. Eigenmode structures of the three types of unstable eigenmodes.

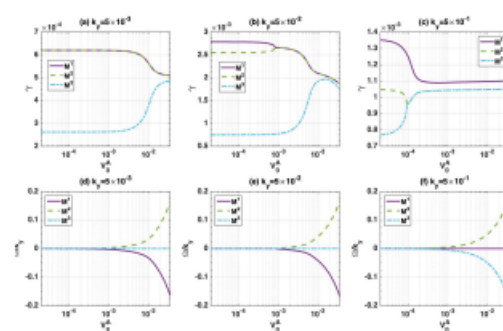


Fig. 2. Effects of the anti-symmetric shear flow on the unstable eigenmodes.

DI II-D 托卡马克中环形阿芬本征模的饱和机制及其对高能粒子输运的第一性原理模拟研究

包健¹、张文禄¹、林志宏²

¹中国科学院物理研究所, 北京 100190

²加州大学欧文分校, 美国 92697

Email: jbao@iphy.ac.cn

摘要: Toroidal Alfvén eigenmode (TAE) has been found to induce large energetic particle (EP) transport in tokamaks and stellarators. In order to predict the nonlinear saturation amplitude of TAE which determines the EP transport level in burning plasmas such as ITER, we need to understand the TAE nonlinear saturation mechanisms, which could be complicated by the wave-wave and wave-particle interactions, non-perturbative effects, and toroidal geometry.

In this work, we carried out the nonlinear gyrokinetic simulation of the TAE for DI II-D discharge #142111. We found that dominant TAE saturation mechanism is the shearing of zonal flow. The effects of zonal current is much smaller than the zonal flow. Zonal fields (zonal flow and zonal current) are nonlinearly forced driven by the TAE three-wave couplings with a growth rate twice the linear TAE growth rate. Localized current sheets with $k_{\parallel}=0$ but finite toroidal mode number n are nonlinearly generated with a growth rate about 3 times of linear TAE growth rate. These current sheets are driven by a nonlinear ponderomotive force (dynamo effects in MHD terminology) and can lead to nonlinearly-driven tearing instabilities as recently observed in MHD-gyrokinetic hybrid simulations [1]. When zonal fields are removed in the simulation, the TAE mode structures are eventually broken up by nonlinear $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ convection, which gives a much higher saturation amplitude compared to the case with zonal fields as shown by Figure 1. Our first principle gyrokinetic simulations support the view that TAE saturation amplitude is determined mostly by zonal flow shearing rate, rather than simply by linear growth rate from quasilinear theory.

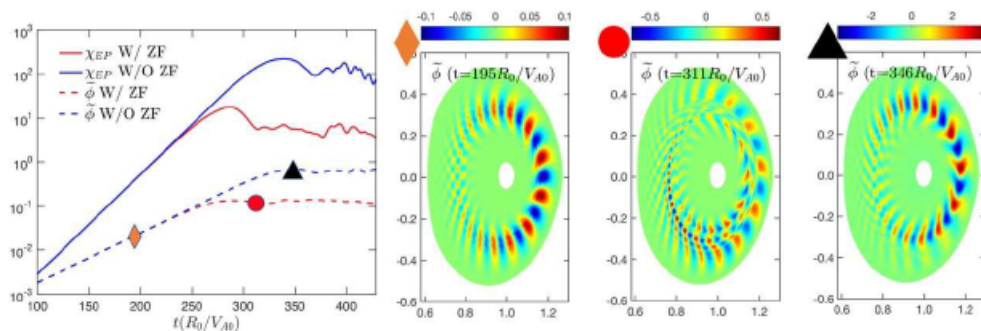


图 1 Left: TAE amplitude and energetic particle heat conductivity evolutions with and without zonal fields. Right: TAE mode structures at 3 time steps of linear stage, nonlinear stage with zonal field and nonlinear stage without zonal fields.

关键词: TAE, Zonal fields, Nonlinear coupling, Gyrokinetic, Transport.

参考文献

[1] Andreas Bierwage et al., Nature Comm. 9, 3282 (2018).

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11675256, NO. 11675257)。

Verification of an energetic-electron driven beta-induced Alfvén eigenmode in the HL-2A tokamak

Yang chen, Wenlu Zhang,* Zhihong Lin

¹Institute of Physics, Chinese Academic of Science, Beijing 100190, China²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China³Peking University, Beijing 100871, China⁴University of California, Irvine, California 92697, US**Abstract:**

An energetic-electron-driven beta-induced Alfvén eigenmode (e-BAE) in an HL-2A tokamak experiment (discharge #17461) was studied using a gyrokinetic particle simulation code (GTC). Investigations of e-BAEs excited by an initial perturbation, an external antenna and an energetic-electron pressure gradient were performed, and the measured eigenfrequencies were found to be close to the experimental observations and the theoretical predictions. The damping mechanism is also discussed based on the simulation results. The e-BAE becomes unstable when the driving force of the energetic-electron pressure gradient exceeds the total background damping. Simulations show that the e-BAE propagates along the diamagnetic direction of the energetic electrons and that the most unstable mode number is $n/m = 1/3$, and these findings are in good agreement with the experimental observations. The simulation results also show that the mode is radially localized near the rational surface. The mode width and growth rate both increase as the background plasma density increases. As the density and temperature of the energetic electrons increase, the eigenfrequency increases slightly, and the growth rate increases considerably.

Email: wzhang@iphy.ac.cn

Reference:

- (1) J. Cheng, W. Zhang, Z. Lin, I. Holod, D. Li, Y. Chen, and J. Cao, *Physics of Plasmas* 23, 405 (2016).
- (2) W. Chen, X. T. Ding, Q. W. Yang, Y. Liu, X. Q. Ji, Y. P. Zhang, J. Zhou, G. L. Yuan, H. J. Sun, and W. Li, *Physical Review Letters* 105, 185004 (2010).
- (3) Yang Chen, Wenlu Zhang, Junyi Cheng, Zhihong Lin, Chao Dong, Ding Li "Verification of an energetic-electron driven beta-induced Alfvén eigenmode in the HL-2A tokamak" *Physics of Plasmas*(2019) accepted

Particle-in-Cell Simulation Method for Solid density Plasmas

Dong Wu*

Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University

Abstract:

A high-order implicit multidimensional particle-in-cell (PIC) method is developed for simulating plasmas at solid densities. The space-time arrangement is based on Yee and a leapfrog algorithm for electromagnetic fields and particle advancement. The field solver algorithm completely eliminates numerical instabilities found in explicit PIC methods with relaxed time step and grid resolution. Moreover, this algorithm eliminates the numerical cooling found in the standard implicit PIC methods by using a pseudo-electric-field method. The particle pusher algorithm combines the standard Boris particle pusher with the Newton-Krylov iteration method. This algorithm increases the precision accuracy by several orders of magnitude when compared with the standard Boris particle pusher and also significantly decreases the iteration time when compared with the pure Newton-Krylov method. The code is tested with several benchmarks, including Weibel instability, and relativistic laser plasma interactions at both low and solid densities.

This code had been extensively benchmarked with experiments, for example the laser driven ion acceleration experiment conducted at Peking University. This simulation framework can be directly applied to laser driven particle (electron, proton, neutron, and positron, et al) sources, laser driven x/gamma ray sources, laser driven THz radiation, fast ignition inertial confinement fusion and many others. Based on this simulation framework, the future prospect is also discussed.

Email: dwu.phys@zju.edu.cn**Reference:**

- [1] Dong Wu*, W. Yu, S. Fritzsche, and X. T. He, "A high-order implicit particle-in-cell method for plasma simulations at solid densities", **Phys. Rev. E, accepted**
- [2] Dong Wu*, W. Yu, Y. T. Zhao*, D. H. H. Hoffmann, S. Fritzsche, and X. T. He, "Particle-in-cell simulation of transport and energy deposition of intense proton beams in solid-state materials", **Phys. Rev. E, accepted**

基于碳纳米管泡沫靶的水窗段辐射源

寿寅任、王鹏杰、刘建波、梅竹松、曹正轩、潘卓、孔德锋、赵研英、卢海
洋、林晨、马文君、颜学庆

北京大学物理学院, 北京 100871

Email: wenjun.ma@pku.edu.cn & x.yan@pku.edu.cn

摘要: 水窗段辐射一般指波长在 2.3 到 4.4 纳米之间的辐射, 其波长范围恰好在氧和碳的吸收线之间。因此, 水窗段辐射在水中有着较高的透过率而被碳强烈吸收, 这种透过率的差异使得水窗段辐射很适用于水中的细胞成像, 在生物学上有着广泛地应用。水窗段辐射的产生办法主要包括基于加速器的同步辐射和自由电子激光, 以及基于等离子体发光的线辐射光源等。如何利用激光和等离子体相互作用获得高效率的台式水窗段辐射源在近年来成为了研究热点。

本工作主要围绕相对论激光与碳纳米管泡沫靶相互作用, 实验结果表明该体系可以产生高效率的水窗段辐射。实验中利用参数为 1.1 焦、30 飞秒的高对比度激光, 分别作用于平面塑料靶和电离后为临界密度等离子体的碳纳米管泡沫靶, 并使用平场光栅谱仪测量了两种情况下的水窗段辐射, 如图 1 所示。实验结果表明相对于平面塑料靶, 碳纳米管泡沫靶在水窗段的辐射有超过 20 倍的增益, 从入射激光到水窗段辐射的转换效率可以达到 4%。此外, 实验也研究了激光能量、偏振和碳纳米管泡沫靶的厚度对水窗段辐射效率的影响。

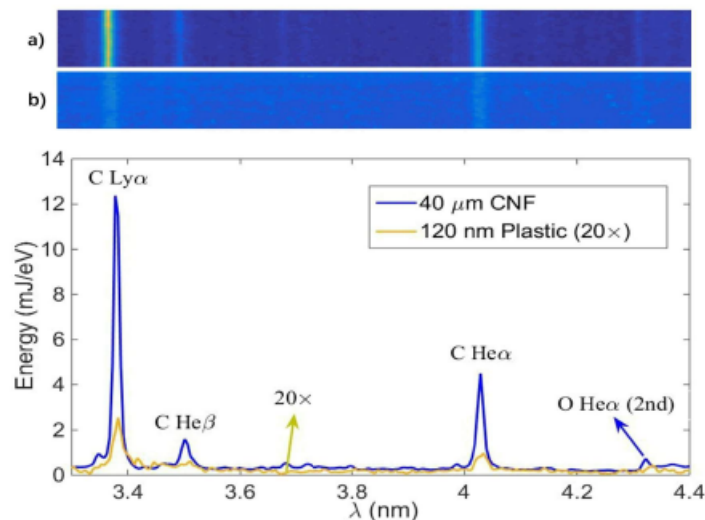


图 1 碳纳米管泡沫靶和平面塑料靶的水窗段辐射对比

关键词: 水窗段辐射 碳纳米管泡沫

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11535001、11775010、61631001)

EAST 装置双环式中子飞行时间谱仪(TOFED)实验室屏蔽准直评估 及散射中子成分研究

孙嘉琪^a, 胡志猛^{d,e}, 葛理健^a, 张一镆^a, 彭星宇^b, 杜腾飞^b, 陈忠靖^b, 张兴^b, 樊铁栓^{a,*}, 李湘庆^a, 钟国强^c, 胡立群^c, 万宝年^c, Giuseppe Gorini^{d,e},

Massimo Nocente^{d,e}, M. Tardocchi^{d,e}

^a 北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

^b 中国工程物理研究院, 绵阳 621900

^c 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

^d Dipartimento di Fisica 'G. Occhialini', Università degli Studi di Milano-Bicocca, Italy 20126

^e Istituto di Fisica del Plasma "P. Caldirola", Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy 20125

Email: jqsun@pku.edu.cn

摘要: 借鉴国际上大型托卡马克(JET, JT-60U)上屏蔽准直方案, 在与EAST的J窗口相对的大厅屏蔽墙外建立一个面积约40 m²的全封闭中子诊断实验室。该实验室通过一个长约150 cm、直径仅为4 cm的准直孔与EAST大厅相连, 用于放置包括飞行时间中子能谱仪(TOFED)在内的相关中子诊断设备, 并展开相关等离子体物理实验研究。实验室与EAST大厅之间的150 cm厚屏蔽墙壁可以非常有效地减少TOFED谱仪探测的本底中子和伽玛射线, 其余部分的屏蔽材料为40 cm厚混凝土墙。本工作采用蒙特卡罗程序MCNP5对实验室的屏蔽准直效果进行了详尽的模拟, 评估了准直孔准直效果和实验室内及周围敏感区域的剂量水平, 模拟了TOFED散射中子能谱成分, 在计算中使用了分布计算和多种减方差方法。根据模拟结果, 中子诊断实验室对周围环境的影响很小, 确保谱仪屏蔽外人员可到达区域的剂量低于安全限值2.5 μ Sv/h; 所设计的准直孔使得中子束流几乎完全垂直于S1探测器入射, 同时, 通过模拟分析了入射中子经过散射后的中子能谱分布、TOFED谱仪视野内散射中子比例, 为TOFED基于中子能谱诊断的快离子物理研究提供依据。

关键词: 中子能谱诊断 飞行时间谱仪 散射中子 准直孔 安全剂量

参考文献

- [1] Nocente *et al.* Calculated neutron emission spectrum with knock-on effects for RF heated (3He) D plasmas, *J. Nucl. Fusion*, 2011, 51(6):063011.
- [2] Chen *et al.*, Simulation of neutron emission spectra from neutral beam-heated plasmas in the EAST tokamak, *Nucl. Fusion*, 2013, 53, 063023
- [3] Zhang *et al.* The Design and Optimization of a Neutron Time-of-Flight Spectrometer with Double Scintillators for Neutron Diagnostics on EAST, *J. Plasma Sci. & Tech.*, 2012, 14(7):675-682.
- [5] Du *et al.* Design of the radiation shielding for the time of flight enhanced diagnostics neutron spectrometer at Experimental Advanced Superconducting Tokamak, *J. Rev. Sci. Instrum.*, 2014, 85, 11E115-11E115-3.

[6] Johnson M G *et al.* Modelling and TOFOR measurements of scattered neutrons at JET, *J. Plasma Phys. & Controlled Fusion*, 2010, 52(52):085002.

基金项目：国家磁约束聚变能专项(批准号：2013GB106004, 2012GB101003, 2009GB107001, 2008CB717803)、国家自然科学基金重大项目(批准号：11790324, 91226102)、国家重点研发计划（编号：2016YY0200804, 2017YFF0206205）

拉盖尔激光驱动正负电子等离子体产生环形粒子束

单飞、马燕云、袁赞、李宵宵

国防科技大学文理学院, 长沙 420073

Email: shanfei14@nudt.edu.cn

摘要: 正负电子等离子体因相同的质量, 相反的电性备受科学家的关注, 其存在着大量的未知的物理规律。在传统等等离子体领域激光加速粒子技术, 电子和离子加速互相影响解析出多种加速方案, 电子和正电子可以使得某些现象相互抵消, 无质量差异以及相反的电性使得正电子和电子可以同时被加速, 使得整体加速保持近电中性, 得到具有高能量的近中性的粒子束团, 因此研究激光与正负电子等离子体相互作用有助于理解其相关性质。

拉盖尔激光因其独特的等相位面使得粒子加速过程中出现很多复杂的现象, 在加速丝靶中, 可将电子从靶中周期性的拉出形成环形脉冲, 由于角向磁场和径向电场使得脉冲稳定传播。在与正负电子等离子体丝靶相互过程中, 因为相反的电性, 使得螺旋脉冲的方向相反, 电子脉冲和正电子脉冲之间相差半个波长, 稳定传播, 在一定空间尺度上, 得到正负电子环形脉冲, 线极化拉盖尔激光脉冲峰值强度为 10^{21}w/cm^2 , 传播 $100 \mu\text{m}$, 得到环形粒子脉冲能量 150MeV 。高能量集中性较好的正负电子脉冲可以为正负电子对撞机提供新的思路。

关键词: 正负电子等离子体 拉盖尔激光 丝靶 环形脉冲

参考文献

- 【1】 Ruf M, Mocken G R, Muller C, et al. Pair production in Laser Fields Oscillating in Space and Time[J]. Physics Review Letter, 2009, 102: 080402
- 【2】 Shen B F, Meyer-ter-Vehn J. Pair and g-photon production from a thin foil confined by two laser pulses[J]. Physics Review E, 2001, 65: 016405

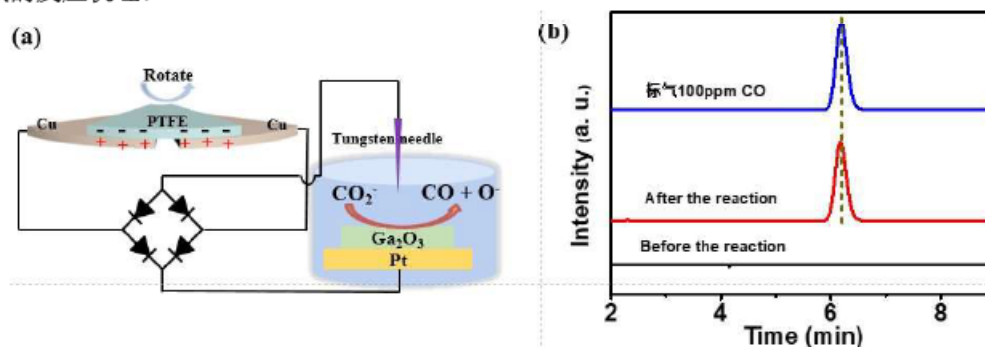
摩擦电微等离子体辅助二氧化碳催化分解制备可再生能源

向晓晨、李素敏、赵珂、张宝、时雪、张文河、程纲*

河南大学, 材料学院, 特种功能材料教育部重点实验室, 开封, 475002.

Email: chenggang@henu.edu.cn (G. Cheng)

能源和环境是世界各国共同关心的问题, 也是社会可持续发展的关键。由于高压 (HV、kV) 和低电流 (μA) 是摩擦电的两大输出特性, 不适合无电源管理电路 (PMC) 直接驱动常规电器, 但 PMC 往往会造成能量损失。同时, 可再生能源 (如风能和太阳能) 具有间歇性、波动性和非周期性等特点, 严重影响了传统电力的稳定性和质量, 限制了其大规模利用。利用储能技术是解决这一问题的有效途径之一。二氧化碳转化为燃料和增值化学品被认为是实现碳-碳循环的关键技术。近年来, 等离子体被认为是一种近室温、低能耗的二氧化碳转化新技术。2018年, 王氏团队提出了将等离子体源与 Teng 结合的摩擦电浆概念, 实现了大气压力等离子体与机械刺激的结合, 使得 Teng 微等离子体与二氧化碳转化的结合具有自然优势。本研究证实, 二氧化碳是摩擦电微等离子体的关键活性物质。实现分子活化的一个潜在途径是将初始电子转移到二氧化碳中, 以产生相应的阴离子自由基 CO_2^- 作为中间体。同时引入富氧空位催化剂进一步活化气体分子, 降低吸附能。结合 X 射线光电子能谱和密度泛函理论, 可以识别和表征微等离子体催化的基本理论理论和摩擦电微等离子体还原二氧化碳的反应机理。



基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 61522405), 中原科技创新领军人才项目 ((194200510004), 中国高校长江学者和创新团队研究计划 (PCS IRT_15R18)。

Toroidal modelling of core plasma flow damping induced by RMP fields

张能、刘钺强、余德良、王硕、董冠岐

核工业西南物理研究院, 成都 621001

*Email: zhangn@swip.edu.cn

摘要: Resistive plasma response to the $n=1$ RMP field is systematically investigated for a high-beta hybrid discharge in ASDEX Upgrade. Both linear and quasi-linear response are modelled using the MARS-F and MARS-Q codes, respectively. Linear response computations show a large internal kink response when the plasma central safety factor q_0 is just above 1. This internal kink response induces core neoclassical toroidal viscous (NTV) torque, which is significantly enhanced by the precessional drift resonance of thermal particles in the super-banana regime. Quasi-linear simulation results reveal a core plasma flow damping by about 25%, agreeing well with experimental observations, with the NTV torque playing the dominant role. Sensitivity studies indicate that the internal kink response and the resulting core flow damping critically depend on the plasma equilibrium pressure, the initial flow speed, the coil phasing and the proximity of q_0 to 1. No appreciable flow damping is found for a low β_N plasma. A relatively slower initial toroidal flow results in a stronger core flow damping, due to the enhanced NTV torque. Weaker flow damping is achieved as q_0 is assumed to be farther away from 1. Finally, a systematic coil phasing scan finds the strongest (weakest) flow damping occurring at the coil phasing of approximately 20 (200) degrees, again quantitatively agreeing with experiments.

关键词: Internal kink response, Quasi-linear simulation, flow damping, NTV

致谢: ITER 专项 (2014GB104004), 国家自然科学基金项目 (NO. 11675050, 11605046, 11775069) 等

J-TEXT 托卡马克上共振磁扰动对边缘湍流和运输的影响

吴婷^{1*}, 聂林¹, 许敏¹, 阳杰², 陈志鹏², 石跃江³, 李达², 柯锐¹, 龚少博⁴, 余羿⁴, 龙婷¹, 陈逸航¹ 以及 J-TEXT 团队

¹核工业西南物理研究院, 成都 610041, 中国

²华中科技大学, 武汉 430074, 中国

³韩国国立大学, 首尔 08826, 韩国

⁴中国科技大学, 合肥 230026, 中国

摘要: 本文在使用探针阵列研究了 J-TEXT 托卡马克上共振磁扰动 (RMP) 对于边缘等离子体湍流和运输的影响。通过比较 RMP 电流为 6 kA (2/1 模) 和 0 kA 两种情况下 edge 和 near SOL 区域的涨落, 发现在 $\rho \sim 0.9$ 的位置, 湍流的主要频率范围是在 40-150 kHz 且被 RMP 抑制; edge 和 near SOL 区域的径向粒子通量降低; near SOL 区域的 blob 运输大大降低, 这与 TEXTOR[1]上结果一致。因此可以得出结论 RMP 电流为 6 kA 时抑制了 edge 和 near SOL 区域的湍流和运输以及 near SOL 区域 blob 的运输。这个结果意味着 RMP 可能成为降低 edge 和 near SOL 区域的湍流和运输以及 blob 运输的有效手段。

关键词: 共振磁扰动, 湍流运输, blob

参考文献

[1] Y. Xu et al., Reduction of the turbulent blob transport in the scrape-off layer by a resonant magnetic perturbation in TEXTOR, Nucl. Fusion, 2016,55 ,076005

[2] M. Jiang et al., Nucl. Fusion, 2019, 59, 046003

HL-2A 托卡马克上喷气成像诊断观测 blob 实验研究

袁金榜^{1*}、袁博达^{1,2}、许敏¹、余羿²、聂林¹、柯锐¹、王占辉¹、龚少博^{1,2}、

吴婷¹、吴一帆^{1,2}、龙婷¹、王华杰¹、刘灏^{1,2}

1. 核工业西南物理研究院, 成都 610041

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026

*Email: yuanjb@swip.ac.cn

摘要: HL-2A 托卡马克上新近开发了一套喷气成像诊断 (GPI) 系统, 并成功应用于托卡马克外中平面附近大尺度相干结构 blob 的观测。首先介绍喷气成像诊断的原理和在 HL-2A 装置上的实验设置, 通过与 HL-2A 上郎缪探针测量得到离子饱和流信号的比对, 证实了喷气成像诊断测量的是电子密度扰动信号; 其次展示喷气成像诊断用于研究等离子体边界和刮削层 (SOL) 中的 blob 的实验研究结果。首先计算了喷气成像诊断测量密度扰动的统计特征, 包括谱线强度的概率分布函数 (PDF), 偏度和峰度剖面等, 发现这些统计量随着径向向外都呈现出上升趋势, 表明远刮削层可能存在独立的、高强度的 blob 结构, 可能对第一壁造成损伤, 并研究了极向剪切流对 blob 结构特征长度的影响。此外, 利用喷气成像诊断二维高空间分辨率的优点, 通过连续成像记录了 blob 产生、运动、发展的轨迹, 并示出了原始图像和相对高频 (> 10kHz) /低频 (1-10kHz) 分量图像的特征的比较。对 blob 结构和高速运动的观测结果充分证明了 GPI 诊断的高性能, 将为未来边界区域湍流的测量发挥重要作用。

关键词: 喷气成像诊断, blob

参考文献 (中文小五号宋体, 其中英文和数字为 Times New Roman 小五号字)

- [1] S J Zweben et al, Invited Review Article: Gas puff imaging diagnostics of edge plasma turbulence in magnetic fusion devices *Rev. Sci. Instrum.* 2017 88 041101
- [2] J Cheng et al, Statistical characterization of blob turbulence across the separatrix in HL-2A tokamak *Plasma Phys. Control. Fusion* 2010 52 055003
- [3] O. Grulke et al, Experimental investigation of the parallel structure of fluctuations in the scrape-off layer of Alcator C-Mod *Nucl. Fusion* 2014 54 043012

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11575055, 11705052, 11875124, 11475058 和 11475056), 国家重点研发项目 No. 2017YFE0300405, 国家 ITER 专项项目 Nos. 2015GB104000。

EP008

专题代号: E

中国环流器二号 A 托卡马克 LHCD 期间高能电子动力学研究

张轶波^{1, a)}, D.Mazon², 张洁¹, Y.Peysson², 周建¹, 杨进蔚¹, 李旭¹,
宋先瑛¹, 白兴宇¹, 石中兵¹, 杨青巍¹, 许敏¹, HL-2A 组

¹核工业西南物理研究院, 成都 610041, 中国

²法国原子能委员会 (CEA) 聚变研究所 (IRFM), 13108, 法国

a) 通讯作者: 张轶波, zhangyp@swip.ac.cn

摘要: 硬 X 射线相机是开展高能粒子物理研究的关键诊断系统^{1,2}, 可以提供高能电子在等离子体内时空分布的演化信息。中国环流器二号 A (HL-2A)³托卡马克新发展了一套硬 X 射线相机系统, 该相机具有 21 测量通道, 探测能量范围 20-200 keV。该相机安装在 HL-2A 装置中平面窗口, 垂直观察等离子体, 等离子体覆盖范围 $\rho \leq 0.7$, 空间分辨率可达 2 cm。硬 X 射线相机系统在 HL-2A 装置 2018 年度实验期间成功投入运行, 并在等离子体低杂波电流驱动 (LHCD) 期间取得丰富的实验结果⁴。低杂波电流驱动是目前为止驱动效率最高的非感应电流驱动方法, 是研究长脉冲稳态运行和先进托卡马克位形等物理问题不可或缺的重要手段。利用硬 X 射线相机我们对 LHCD 期间高能电子分布进行了测量研究, LHCD 期间高能电子主要在 40-60 keV 能量段产生, 并且具有非常明显的峰化分布, 这些测量结果表明 HL-2A 装置 LHCD 期间低杂波功率主要在等离子体芯部沉积。在短脉冲 LHCD 放电期间, 观察到逃逸电子产生被显著增强。硬 X 射线测量结果表明 LHCD 期间有大量的快电子产生, 快电子尾部至少达到了 200 keV。快电子能量已超过了临界逃逸能量, 从而高于临界逃逸能量的部分快电子将被等离子体环电场加速而成为逃逸电子, 从而诱发了逃逸增强。利用硬 X 射线相机在 HL-2A 装置深入开展低杂波电流驱动和高能电子实验研究将是我们下一步的主要工作。

关键词: 高能电子, 低杂波电流驱动, 硬 X 射线相机, 逃逸电子, 托卡马克

参考文献:

[1] O. Barana, et al., Plasma Phys, Control. Fusion 49, 947 (2007).

[2] Y.P. Zhang, et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 103501(2010).

[3] M. Xu, et al., Nucl. Fusion 55, 104022 (2015).

[4] Y.P. Zhang, et al., AIP Advances accepted (2019).

基金项目: 国家自然科学基金项目(NO.11775068)。

HL-2A 液化杂质气体射流注入等离子体破裂防护的初步结果

陈程远、董云波、冯北滨、肖国梁、臧临阁、殷娇、季小全、李永高、高金明、杨青巍、许敏、HL-2A 团队

中核集团核工业西南物理研究院, 成都 610225

Email: chency@swip.ac.cn

摘要: 等离子体破裂预测和防护是 ITER 及未来聚变堆面临的关键物理和技术问题之一。目前等离子体破裂防护的手段主要有大量气体注入 (MGI)、弹丸注入 (PI) 和破碎弹丸注入 (SPI) 等, 人为主动地注入大量杂质, 包含各种的气态、固态的杂质, 使等离子体的内能通过电磁辐射迅速地释放出来, 降低器壁局部的热负荷。液化气体射流注入 (LGI) 是一种新颖的液态杂质注入技术, 将温度降低至杂质气体的临界温度以下, 同时增加压强至超过杂质气体的饱和蒸气压, 杂质气体达到液化的条件, 液化的杂质气体在气源压强的作用下通过阀门喷口喷出, 以液体射流的方式注入等离子体。

HL-2A 装置上的超声分子束注入 (SMBI) [1] 技术具有高压和低温的特点, 满足液化气体射流注入的基本条件, 基于 SMBI 系统进一步发展了液化杂质气体射流注入技术。液化气体射流注入能够兼顾大量气体注入和杂质弹丸注入的特点。液体具有与固体相当的密度, 远高于气体; 同时液体与气体属于流体, 易于控制注入的杂质数量。通常情况超声分子束注入用于等离子体加料, 而液化气体射流比超声分子束注入更多的杂质粒子, 更适用于等离子体破裂防护。

在实验室采用易液化的二氧化碳作为工作气体, 试验了液化气体射流注入技术, 获得了液化气体射流的基础数据。并且在 HL-2A 装置上开展了液化杂质气体射流注入等离子体破裂防护和逃逸电子耗散的实验研究, 取得初步的实验结果。实验结果表明液化杂质气体射流注入能够用于等离子体破裂防护, 有效地耗散逃逸电子。

关键词: 液化气体射流注入; 大破裂; 破裂防护; 托卡马克

参考文献 (中文小五号宋体, 其中英文和数字为 Times New Roman 小五号字)

【1】 L. H. Yao, B. B. Feng, C. Y. Chen *et al.*, Plasma behavior with hydrogen supersonic molecular beam and cluster jet injection in the HL-2A tokamak, *Nuclear Fusion*, 2007, 47, 1399~1410.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11875123)

反馈控制对电阻等离子体电阻壁模(RP-RWM)色散关系 Δ' 的修正

何玉玲¹, 刘钺强²

¹ 广东省广州市, 华南师范大学, 广东省量子工程与量子材料重点实验室, 510006

² 美国, 加利福尼亚州, 圣地亚哥, 通用原子能公司, CA92186-5608

E-mail: heyl@m.scnu.edu.cn and liuy@fusion.gat.com

摘要: 先进托卡马克实验装置要维持长时间稳态运行, 电阻等离子体磁流体不稳定性是其中很重要障碍之一。目前 RP-RWM 的稳定方法主要有两种: 一是通过等离子体自身旋转的被动控制方法^[1-4]; 二是通过外加反馈控制线圈的主动控制方法^[5-6]。由于等离子体旋转自身有诸多不确定因素, 目前的实验装置更倾向于主动控制方案。为使托卡马克装置(例如 ITER)在放电过程中采用反馈控制对 RP-RWM 进行时时有效抑制。本工作主要是理论研究简单比例(P)和比例微分(PD)两种反馈控制系统对 RP-RWM 的稳定化作用。模式的色散关系主要是由一个关键参数 Δ' 决定的, 因此, 也可以说是理论上研究上述两种反馈控制系统对 Δ' 的修正。研究结果表明, 对模式稳定效果最好的是放置于电阻壁外侧的线圈和外侧极向传感器组成的反馈控制方案。当等离子体比压为零时, 发现增大比例反馈增益可以使 Δ' 的值降低甚至小于零(比例反馈控制对 RP-RWM 具有抑制作用), 仅增大微分增益也可以使 Δ' 继续降低趋于零, 但不会小于零。当等离子体比压为有限值时, 发现增大比例微分反馈增益可以不仅使 Δ' 的值降低, 当达到比例微分增益的临界值时还会激发相应对称的 Δ' 的复频(也就是激发模式的实频)。这主要是由于采用有限压强的模型后, 会产生旋转的撕裂模, 这会在电阻壁上产生涡流, 涡流反作用会激发模式的实频。

关键词: 电阻等离子体电阻壁模; 反馈控制; 托卡马克装置

参考文献:

- [1] A. Bondeson and D. Ward, Phys. Rev. Lett. **72**, 2709 (1994)
- [2] J. M. Finn, Phys. Plasmas **2**, 3782 (1995).
- [3] A. Bondeson and H. X. Xie, Phys. Plasmas **4**, 2081 (1997).
- [4] Y. L. He, Y. Q. Liu, et al. Phys. Rev. Lett. **113**, 175001 (2014)
- [5] Y. Q. Liu and A. Bondeson, Phys. Rev. Lett. **72**, 2709 (1994)
- [6] Y. Q. Liu, R. J. Hastie, and T. C. Hender, Phys. Plasmas **19**, 092510 (2012)

本文由国家自然科学基金理论物理专项(No. 11847219)和中国博士后基金共同资助。

EAST 上 LHCD 驱动同向和反向等离子体环向旋转实验研究

杨进^{1,2}, 吕波^{2*}, 向东¹, 李颖颖², 陈俊^{3,2}, 王福地², 张洪明²
符佳², 刘海庆², 臧庆², 储宇奇², 刘建文², 王勋禹^{1,2}, 宾斌²
何梁^{1,2}, 万顺宽², 龚学余¹, 万宝年², 叶民友³, EAST 团队

(1 南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001

2 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031

3 中国科学技术大学 工程与应用物理系 合肥 230026)

*Email: blu@ipp.ac.cn

摘要: 旋转和旋转剪切能抑制磁流体不稳定性并增强等离子体的约束, 在托卡马克实验中有很重要的作用。研究发现低杂波电流驱动 (LHCD) 可以在托卡马克装置上有效地驱动等离子体旋转, 在国内外主流的托卡马克装置上, 都观察到了显著的旋转改变, 研究低杂波的驱动机制, 一直是国内外聚变研究的一个重要课题。

在 EAST 装置上, 较早研究了 2.45GHz LHCD 驱动的等离子体旋转, 并认为是边界旋转的改变导致芯部旋转的同电流的增加。新的 4.6GHz 的 LHCD 系统, 更加丰富了 LHCD 驱动旋转的研究工具, 发现 4.6GHz 的 LHCD 可以更有效的驱动等离子体旋转, 也主要观察到等离子体旋转都是同电流方向 (co-current) 的驱动, 随着 EAST 运行参数的拓宽, 近期实验首次观测到了反电流方向 (counter-current) 的驱动现象, 本文研究了 LHCD 驱动同向 (co-current) 和反向 (counter-current) 驱动的实验结果, 较系统的分析了 LHCD 旋转与驱动参数的相互依赖关系, 通过与前期同向驱动旋转实验比较分析, 进一步明确了 q 剖面对 EAST 上 LHCD 驱动等离子体环向旋转出现的同电流和反电流不同实验结果的影响, 芯部旋转频率改变随 q_0 的变化, 发现在低的等离子体电流情况下, 二种不同驱动效果的实验 q_0 都小于 1, 出现了与 Rice 等人的理论有不一样的情况, 为下一步研究 LHCD 驱动等离子体旋转驱动机制提供了新的实验依据。

关键字: 低杂波电流驱动 (LHCD) 环向旋转 电子温度 离子温度 q 剖面 q_0

参考文献

- [1] Rice J E, Podpaly Y A, Reinke M L, et al. Effects of LHCF on toroidal rotation in Alcator C-Mod plasmas. Nucl Fusion, 53(2013) 093015.
- [2] Shi Y, Xu G, Wang F, et al. Observation of Cocurrent Toroidal Rotation in the EAST Tokamak with Lower-Hybrid Current Drive. Physical Review Letters, 106(2011) 235001.
- [3] Xiang-Hui Yin et al. Toroidal rotation induced by 4.6GHz lower hybrid current drive on EAST tokamak. Chin. Phys. B, 26(2017), 115303.

EP012

专题代号: E

磁路和天线位置对 2 厘米 ECRIT 离子引出及耦合电压影响的实验研究

夏旭、杨涓、金逸舟、杭观荣、付瑜亮、胡展、

西北工业大学航天学院, 西安 710072

Email: xiaxu@mail.nwpu.edu

摘要: 电子回旋共振离子推力器(Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster, ECRIT)具有寿命长、可靠性高, 无阴极烧蚀等特点, 可作为微小卫星的主推进系统, 或是执行卫星的轨道控制任务以及深空探测任务等, 是一种未来值得大力发展的等离子体推进装置。由于磁路和天线位置对 ECRIT 放电室内部的电子加热、等离子体约束和输运过程都有很大的影响, 进而影响离子束流的引出和中和器的耦合电压。本文开展不同磁路和天线位置 2 厘米 ECRIT 离子束流和耦合电压变化规律的实验研究, 从中获得合理的推力器结构。实验研究结果表明: 保持天线空间位置不变, 合理的磁路结构有利于引出离子束流并降低耦合电压; 在合理磁路结构条件下, 离子源和中和器存在有利于离子引出和降低耦合电压的合理天线位置; 中和器协同工作的离子源束流引出比独立工作时高; 微波功率和氙气流量分别为 1 W、0.1 sccm 的中和器与功率和流量分别为 2 W、0.3 sccm 的离子源能良好匹配工作, 性能指标为离子束流 5.3 mA、放电损耗 337.5 W/A、推进剂利用率 24.7%、推力 368.6 μ N、比冲 1277.6 s、中和器耦合电压 17.4 V。研究结果有助于理解此类推力器工作机理, 并为设计和性能优化提供参考。

关键词: 电子回旋共振离子推力器束流引出 中和

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11875222)

基于 MIM 波导结构的透射效应研究

朱航、房孟婷、刘冬冬、邵健

徐州工程学院数学与物理科学学院, 徐州 221018

Email:gnod6@sohu.com

摘要:近年来, 基于 MIM 波导的各种滤波结构从理论上被相继提出。表面等离子体亚波长波导结构器件中的等离子体诱导透明(plasmon-induced transparency, PIT)及 Fano 效应研究已成为微纳光学领域的热点^[1]。PIT 可以通过明、暗两种共振模式的耦合实现窗口控制的, 其中暗模式由相邻共振元中间的等离子体共振亮模式(即外界模式)转化而成。在 MIM 表面等离子体波导系统中实现有效的滤波特性是一个很有意义的研究方向。

课题组团队采用一种基于金属-介质-金属电磁诱导吸收结构, 用有限元方法 COMSOL 软件通过改变耦合腔的各种参数及位置进行模拟实验。随后, 设计了几种基于等离子体诱导的亚波长 MIM 波导微纳结构, 进一步研究其等离子体诱导透明及吸收效应。利用传输矩阵、干涉理论、耦合共振腔、共振环等理论进行理论分析, 为进一步实验及器件制造提供可靠的理论的支持。

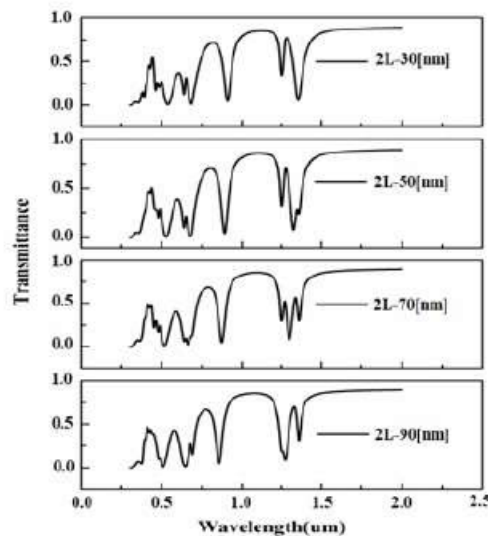


图 1 微纳结构电磁诱导透明效应透射谱

关键词: 等离子体激元 电磁诱导透明 亮模式 暗模式

参考文献

【1】 Biswas S, Duan J, Nepal D, et al. Plasmon-induced transparency in the visible region via selfassembled gold nanorod heterodimers. *Nano Lett*, 2013,13:6287–6291

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (NO. BK20170247)。

漂移阿尔芬波高能量粒子稳定性程序开发及物理模拟

李跃岩¹、胡双辉²、肖湧¹¹浙江大学, 杭州 310058²贵州大学, 贵州 550025Email: yyli@zju.edu.cn

摘要: 漂移阿尔芬波高能量粒子稳定性程序 (DAEPS 程序), 是为了研究在磁约束聚变中环形等离子体中观察到的各种漂移性阿尔芬波的物理激发机制, 而开发的一个线性稳定性有限元本征值程序。其设计初衷是为研究理解无碰撞等离子体中的漂移性阿尔芬波物理, 以及高能粒子对阿尔芬模的激发。DAEPS 程序包含了环形等离子体的径向不均匀性、压力的各向异性、磁力线弯曲效应、有限拉摩尔轨道半径效应、波粒子共振效应等关键物理[1,2]。传统理论[3]将气球模空间分为外区 (惯性区) 和内区 (理想磁流体区), 利用外区的渐进行为与内区的扰动势能通过渐进匹配构成类鱼骨模色散关系, 而 DAEPS 程序可以通过自洽计算得到模结构的渐近行为。在 DAEPS 程序中, 设计了一套迭代算法来求解该物理问题的非线性积分微分本征值方程, 其优势是不仅能够得到本征频率和增长率, 还可以自洽的算出模结构的渐近行为以及扰动势能中的流体和动理学贡献, 并能自动满足鱼骨模色散关系, 从而更为准确并且方便使用以加深对物理问题的理解。由于能够满足合理的渐近行为, DAEPS 可以用来准确的计算临界稳定性和阿尔芬连续谱。另外在 DAEPS 程序中还为一些典型的阿尔芬模设计了简化模型, 利用这些简化模型, 可以在不损失太大精度的前提下极大地加快程序的计算速度, 以为实验研究提供参考。在 s - α 模型平衡下, 我们采用 MHD 极限, 利用 DAEPS 程序研究了包含热离子动理学压缩效应的 BAE/KBM 电磁模和高能粒子激发环阿尔芬本征模以及高能捕获粒子激发 α TAE 等物理, 并获得了这些模的频率与增长率以及模结构的渐近行为。

关键词: 漂移阿尔芬波、回旋动理学、有限元方法

参考文献 (中文小五号宋体, 其中英文和数字为 Times New Roman 小五号字)

- 【1】 Chen L. and Zonca F. 2016 Rev. Mod. Phys. 88(1)
- 【2】 Hu S. and Chen L. 2004 Phys. Plasmas 11(1)
- 【3】 Zonca F. Chen L. and Santoro R. A. 1996 Plasma Phys. Controlled Fusion 38(11)

基金项目: 国家磁约束聚变能发展专项 (No. 2015GB110000) 和国家自然科学基金项目 (NO. 11575158)

Ce:GAGG 闪烁晶体在 X 射线局域辐射流诊断中的应用

侯立飞

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳, 621900)

摘要: 在间接驱动惯性约束聚变研究中, 对于黑腔内部特定区域(非焦斑区、焦斑区、靶丸区域) X射线辐射流的探测十分重要。传统辐射流诊断方法主要是测量黑腔的腔壁辐射, 利用平响应X射线探测器(FXRD)等设备通过激光注入口测量黑腔辐射流, 结合模拟计算推导腔体内部不同区域的辐射流。但该方法受限于缩孔现象、基频与二倍频激光辐照、程序状态方程等参数精确性的影响。因此, 结合针孔成像与平响应X射线探测技术提出了一种X射线局域辐射流诊断技术, 用于诊断黑腔内部特定区域X射线辐射流。基于诊断设备搭载平台的新型局域辐射流探测器(SFRD), 利用Ce:GAGG 闪烁晶体实现对靶点的X光成像。Ce:GAGG 闪烁晶体结合监视CCD可以实时给出探测器瞄准结果, 并给出靶的X射线分布状况。为了保证晶体与探测器的良好匹配, 开展了晶体的分辨力与发光效率的初步研究。结合X射线衍射仪与同步辐射装置开展50 μm , 100 μm , 150 μm 几种不同厚度的晶体发光效率的研究。该探测器可在线自动完成测量区域的准确选定, 获得光斑区、非光斑区、靶丸再发射辐射流定量精密化定量实验结果, 对评估黑腔驱动能力和驱动品质等有着十分重要的意义。而Ce:GAGG 闪烁晶体对探测器的准直和操作效率具有重要作用。

关键词: Ce:GAGG 闪烁晶体, 局域辐射流探测器, 黑腔

基于神光激光装置的准 Plank 光谱辐射源

张文海、杜华冰、尚万里、杨国洪、韦敏习、车兴森、侯立飞、杨轶濛

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

Email: zhangwenhai911@126.com

摘要: 激光与靶物质相互作用产生的 **Plank X** 光辐射源在很多领域有着极其重要的应用。目前, 大部分激光打靶产生的 **X** 光谱为非 **Plank** 谱, 这具有明显的带状谱结构。本工作介绍了一种基于神光 **III** 原型装置的准 **Plank** 光谱辐射源, 通过在铀靶表面镀不同薄膜材料 (金、铝、氮化铀) 以产生准 **Plank** 光谱辐射源, 薄膜材料一方面防止铀材料氧化, 另一方面要求符合材料靶的激光 **X** 光转化效率足够高, 同时高能 **M** 带发射份额足够低。神光 **III** 原型装置打靶实验结果表示表面镀氮化铀薄膜的铀平面靶产生的 **X** 光谱为准 **Plank** 谱, 其中 **X** 光产生效率与金平面靶相当, 同时高于 **1.6keV** 的 **M** 带能量份额约为金平面靶 **M** 带份额的一半。

关键词: 准 **Plank** 辐射源 转化效率 **M** 带发射份额

液体闪烁体中子探测系统与瞬态辐射剂量监测技术

刘红杰, 崔波, 刘东晓, 戴曾海, 卢峰, 周维民, 曹磊峰

- 1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 621900,
- 2) 等离子体物理国家重点实验室, 621900

随着 ICF 驱动激光装置的发展, 相关实验伴随的强伽马辐射为中子诊断提出了新的挑战^[1, 2]。研究了基于芳香烃液体闪烁体的光学特性, 确定了抗伽玛辐射中子探测器所需的液体闪烁体的配置方案。提出了柱锥、半球锥等不同构型的液体闪烁体中子探测器封装设计, 并利用蒙卡程序建立了理论模型, 从头模拟计算了中子入射、能量沉积、可见光产生、可见光经锥引导射到光电倍增管等过程。在探测器的构型、体积等参数优化的基础上, 我们采用 PX+PPO 液体闪烁体结合门控技术, 研制出了余辉低、响应快的中子探测器。分别利用 K-400 中子源对探测器灵敏度进行了标定, 获得了探测器不同偏压下的 DD 中子灵敏度。在星光 III 装置 PW 激光驱动出中子实验和神光 II 升级实验考核测试中, 新研制的液体闪烁体探测器均获得了预期的中子信号。实验结果表明系统满足强伽玛辐射环境下 DD 中子诊断的实验需求, 为快点火实验中子精密诊断奠定了基础。在此基础上, 我们研制了适用于超短脉冲辐射探测的瞬态辐射剂量仪, 可以为超强激光与物质相互作用实验现场提供实时的监测数据。

参考文献:

1. Abe Y, Hosoda H, Arikawa Y, et. al, Characterizing a fast-response, low-afterglow liquid scintillator for neutron time-of-flight diagnostics in fast ignition experiments, *Review Scientific Instruments*, 85 (2014).
2. Stoeckl C, Cruz M, Glebov V.Y, et.al, A gated liquid-scintillator-based neutron detector for fast-ignitor experiments and down-scattered neutron measurements. *Review Scientific Instruments*, 81 (2010), 10D302.

超强激光产生可控脉冲强磁场研究进展

王为武¹, 单连强¹, 蔡洪波², 周维民¹, 谷渝秋¹

1、中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心 绵阳 621900

2、北京应用物理与计算数学研究所 北京 100094

*Email: wangweiwu_wl@126.com

摘要: 激光辐照电容线圈靶可产生几十甚至上千特斯拉的脉冲强磁场, 且磁场形状可控, 该磁场可应用于磁场辅助激光聚变、快电子束准直、磁重联及无碰撞激波等研究。目前利用激光辐照电容线圈靶方法产生强磁场实验研究中, 国内外其他团队主要使用纳秒激光作为驱动源。但由于纳秒激光产生电子束时间长且与磁场形成时间难以分离, 故对于磁场形成起关键作用的电容片间快电子情况了解并不清楚, 磁场产生过程的理论分析部分有待进一步发展和完善。在本报告中, 针对超强激光(激光功率密度 $>10^{18}$ W/cm²)情况, 开展了强磁场产生实验和理论研究。在近期实验中, 通过质子照相方法得到~10J 飞秒激光辐照电容线圈靶产生脉冲磁场随时间变化的完整过程, 实验图像清晰, 和质子照相模拟结果高度一致。根据实验结果对前期建立的磁场产生模型参数进行了修正, 预期 100J 皮秒激光可产生 100T 以上的强磁场; 同时将超强激光条件拓宽到焦耳量级的台面激光器上, 也可产生 10T 以上的强磁场。目前, 国际上近百个超强激光实验室具备该条件产生强磁场, 并进行相关的磁化等离子体研究。

关键词: 超强激光; 强磁场; 电容线圈靶

EAST 装置上 4.6 GHz 低杂波平行波数测量系统

李妙辉, 王云飞, 丁伯江, 吴则革, 王茂, 刘亮, 赵连敏及 LHCD 组

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

Email: mhli@ipp.ac.cn

摘要: 在低杂波物理实验中, 低杂波的平行波数 k_{\parallel} 是决定低杂波在等离子体中传播、吸收以及电流驱动效率的一个关键物理量。在进入等离子体之前的初始 k_{\parallel} 由低杂波天线相邻波导之间的相位差决定, 可以通过电磁波-等离子体耦合软件计算得出; 但当低杂波穿过等离子体刮削层时, 会受到各种非线性效应的影响, 有可能导致其平行波数的变化【1, 2】, 从而影响低杂波的电流驱动效率和加热效果。

本测量系统通过一种带有矩形缝隙的磁探针阵列来耦合特定方向传播的微波(如图 1 所示), 然后通过降频电路, 将探针耦合的高频微波降至 20 MHz 左右, 最后送入多通道同步高速采集卡。经 FFT 数据处理便可以获得磁探针阵列的相位。由于磁探针间的距离 (d) 是固定的, 因此根据 $k = \Delta\phi / d$ 即可获得低杂波的平行波数。目前整套系统已经基本完成安装和调试, 可以用来测量 EAST 4.6 GHz 低杂波从天线端口发射出来后首次在刮削层中传播时的实际平行波数。在本轮物理实验中, 获得了稳定的相位测量结果, 验证了系统的可行性和可靠性。

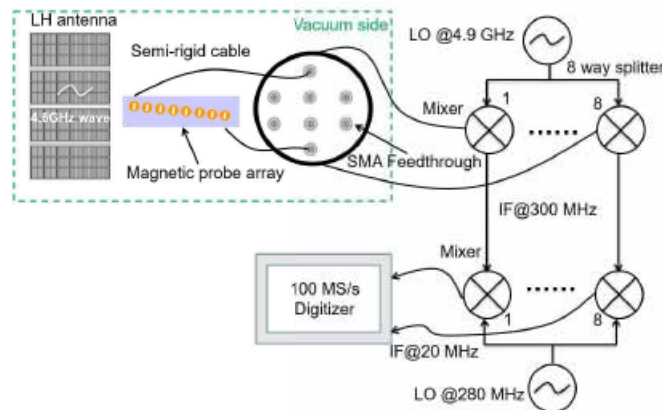


图 1. 4.6 GHz 低杂波平行磁场方向波数测量系统原理图

关键词: 低杂波 平行波数 磁探针

参考文献

- 【1】 R. Cesario *et al.*, Spectral broadening of lower hybrid waves produced by parametric instability in current drive experiments of tokamak plasmas, *Nucl. Fusion* 2006, 46, 462.
- 【2】 M. H. Li *et al.*, Experimental investigation on spectral broadening of lower hybrid waves with different frequencies in the EAST long-pulse plasmas, *Plasma Phys. Control. Fusion* 2019, 61 065005.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11775259); 国家重点研发计划项目 (NO.2016YFA0400603)

EAST 多道运动斯塔克效应诊断与初步实验研究

李义超¹、符佳¹、吕波^{1*}、智玉琴¹、黄耀¹、罗正平¹、李颖颖¹、魏永清²、刘冬梅²、余青江³、吴振伟¹、肖炳甲¹、叶民友³、万宝年

¹中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009

³中国科学技术大学工程与应用物理系, 合肥 230026

Email: blu@ipp.ac.cn

摘要: 电流密度分布是磁约束聚变等离子体的重要分布参数之一, 对开展等离子体平衡、约束与输运, 磁流体不稳定研究具有重要的意义。运动斯塔克效应(Motional Stark Effect)诊断通过测量高速中性粒子的 Stark 分裂谱的偏振方向, 结合 EFIT 平衡反演来计算电流密度分布, 具有空间局域测量, 精度高, 时间分辨率好的诸多优点, 在各大装置上获得了深入的发展。

双折射晶体在外部驱动源的作用下发生弹性形变, 折射率会产生周期性的变化, 当偏振光在经过该调制晶体时, 出射光的偏振方向将产生周期性变化。基于双折射晶体的光弹调制器结合检偏器组成的偏振检测系统, 能够将光的偏振方向转化为光强调制分量的比值, 能够快速而精确的进行偏振方向的实时检测, 非常适用于快速等离子体电流变化的诊断测量。

本论文介绍了当前 EAST 装置上的 10 通道 MSE 诊断系统, 包括光弹调制光路、滤光片耦合器、电子学模块及信号采集与处理系统, 给出了系统离线标定及初步实验测量结果, 结合 EFIT 磁平衡反演获得了电流密度分布, 实现了空间分辨率 $<3\text{cm}$, 时间分辨率 10ms, 偏振角测量精度 $<0.5^\circ$ 的测量能力。

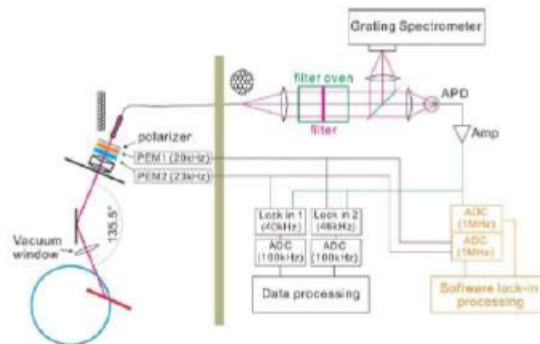


图 1.1 MSE 诊断系统示意图

关键词: 电流密度分布, 安全因子, 运动斯塔克效应诊断, 光弹调制器, 偏振测量

本论文工作得到了国家磁约束核聚变能发展研究专项(2015GB103003)、国家自然科学基金(11605242)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(11911540463), 中国科学院合肥大科学中心“高端用户培育基金”项目(2019HSC-UE011)的支持。

参考文献:

- [1] Fu, J., et al., *Preparations for the motional Stark effect diagnostic on EAST*. Review of Scientific Instruments, 2014. **85**(11): p. 3.

EAST 自发扭矩实验测量的初步试验研究

王勋禹^{1,2}、吕波^{2*}、路兴强¹、李颖颖²、郝宝龙²、陈俊^{3,2}、王福地²、
符佳²、张洪明²、杨进^{1,2}、宾斌²、万顺宽²、龚学余¹、万宝年²、叶
民友³

¹南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001

²中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

³中国科学技术大学工程与应用物理系, 合肥 230026

*Email: blu@ipp.ac.cn

摘要: 等离子体旋转对于提高聚变等离子体的稳定性和约束具有重要意义, 但是对于未来的燃烧等离子体, 中性束注入将难以有效地驱动足够大的转速。而基于各个装置自发旋转数据的 Rice 定标率, 揭示了芯部转速变化量与等离子体参数之间一种普适的关系, 在外推到 ITER 装置上 H 模放电时芯部旋转将达到的 300km/s 量级^[1]。自发旋转在包括 EAST 在内的国内外大装置上都开展了研究, 并发现自发旋转与等离子体压强梯度、温度梯度以及储能有很强的相关性, 但是自发旋转的驱动机制目前尚不明确, 尤其是自发扭矩的量化, 从而可以更可靠的预测聚变堆上自发旋转强度。

EAST 托卡马克目前配备了同向和反向的平衡注入中性束系统, 通过中性束的调制注入, 实现外部中性束扭矩来平衡等离子体自发扭矩, 使等离子体转速在整个剖面置零, 这样外部中性束驱动的扭矩的负值即是等离子体自发扭矩。利用这一思路, 开展了同电流方向、反电流方向的中性束调制注入, 实现了等离子体环向旋转的调制, 初步测量了 L 模下自发扭矩剖面。结合 NUBEAM 模拟, 发现其方向为同电流方向, 在芯部自发扭矩较小, 主要集中在 $\rho > 0.7$ 的边界区域, 并在边界达到峰值, 这与依赖边界强梯度的 $E_r \times B$ 剪切驱动残余协强以及边界热离子轨道损失理论是一致的。同时, EAST 上的测量结果与 Solomon 等在 DIII-D^[2]的测量结果趋势一致, 符合边界 ($\rho > 0.8$) 自发扭矩与边界压强梯度的标定^[3], 从侧面说明了测量结果的合理性, 为下一步开展 H 模自发扭矩的研究奠定了基础。

关键词: 自发旋转 自发扭矩 EAST

本论文工作得到了国家磁约束核聚变能发展研究专项 (2015GB103002), 中国科学院合肥大科学中心重点研发项目 (2017HSC-KPRD002), 国家重点研发计划项目 (2017YFE0301300), 安徽省杰出青年基金 (1908085J01) 的支持。

参考文献:

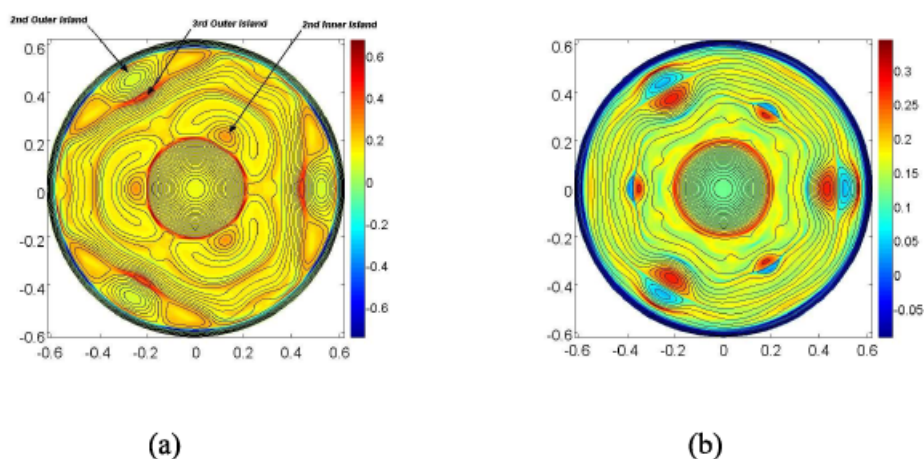
1. J. Rice, et al. Nucl. Fusion **47** (2007) 1618.
2. W M Solomon et al., Plasma Phys. Control. Fusion **49** (2007) B313.
3. W M Solomon et al., Phys. Plasmas **17** (2010), 056108.

柱几何高磁雷诺数双撕裂模非线性演化的数值模拟研究

郭文峰¹, 马骏¹¹ Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui, China

Email:wfguo@ipp.ac.cn

在反磁剪切位型托卡马克放电中, 双撕裂模 (DTM) 是一种重要的磁流体不稳定性。我们基于守恒的非约化磁流体模型, 以及5阶精度的加权本质无振荡数值格式 (WENO), 发展了柱位型下新的非线性磁流体模拟程序, 以开展对高磁雷诺数双撕裂模非线性演化的模拟研究。对于双撕裂模不稳定性线性阶段, 新的模拟程序给出的结果与本征值方法得到的结果符合较好。进一步我们将新模拟程序用于柱位型双撕裂模非线性演化的模拟研究。我们首次发现在柱几何下, 高磁雷诺数双撕裂模的非线性演化中能够形成二级磁岛。具体地说, 当磁雷诺数足够大时, 在非线性演化中外侧和内侧有理面的附近能够先后形成细长的Sweet-Parker (SP) 电流片, 并进一步发生不稳定性, 从而导致电流片断裂并在断裂处产生二级磁岛, 最终系统能演化至一种新的包含若干小磁岛对的准稳态。如图所示。



高磁雷诺数双撕裂模非线性演化不同时刻的磁场 (等值线) 和电流密度 (彩图): (a) $t=3750$, (b) $t=4500$.

This work is supported by the National Key R&D Program of China under Grant No. 2017YFE0300402 and the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos. 11475219, 11775268.

Development of GPU parallel streaming equilibrium reconstruction for ITER operation

Y. Huang¹, Z.P. Luo¹, B.J. Xiao^{1,2}, M. Mattei^{3,4}, A. Mele³, A. Pironti^{3,5}

¹*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China*

²*School of Nuclear Science & Technology, University of Science & Technology of China*

³*CREATE Consortium, Italy*

⁴*Department of Engineering Università degli Studi della Campania L. Vanvitelli*

⁵*Department of Electrical Engineering and Information Technology, Università degli Studi di Napoli Federico II*

In view of ITER operation, it is required to develop an equilibrium reconstruction code able to run in streaming mode, enabling live output of equilibrium parameters during ITER discharge. The requirements, both in terms of latency time (1ms) and accuracy (e.g.1 cm on gap calculation) are highly demanding. The GPU parallel equilibrium reconstruction code P-EFIT [1], which has been routinely providing magnetic equilibrium solution with 129×129 spatial grid for real-time plasma shape and equilibrium control in EAST operation [2], has a great potential to fulfill ITER streaming equilibrium reconstruction requirements.

After adaptation to ITER geometries and parameters, P-EFIT could provide magnetic equilibrium reconstruction using ITER's available magnetic diagnostics (flux loops, saddle coils, magnetic probes and Rogowskii coil). Benchmarks are performed using synthetic magnetic diagnostic signals from ITER plasma equilibria obtained by the CREATE-L [3] and CREATE-NL [4] codes. Initial results comparison show that P-EFIT could meet the accuracy requirement in most of the considered cases; moreover, computational performance test shows that P-EFIT could complete one magnetic reconstruction iteration with a 129×129 spatial grids in 0.7ms on a hardware platform based on Intel E5-2667v3 3.20GHz CPU and Nvidia Tesla V100 16G GPU. Further works will focus on optimizing algorithms and modelling to improve accuracy and computational performance, and on developing a data interface with the discharge simulation systems.

References

- [1] Yue X N, Xiao B J, Luo Z P, Guo Y, "Fast equilibrium reconstruction for tokamak discharge control based on GPU", *Plasma Phys. Control. Fusion* 55, 085016, 2013
- [2] Huang, Y., et al. "Improvement of GPU parallel real-time equilibrium reconstruction for plasma control." *Fusion Engineering and Design* 128(2018):82-85.
- [3] Albanese, R. and Villone, F., "The linearized CREATE-L plasma response model for the control of current, position and shape in tokamaks," *Nuclear Fusion*, Vol. 38, No. 5, pp. 723, 1998.
- [4] R. Albanese, R. Ambrosino, M. Mattei, "CREATE-NL+: A robust control-oriented free boundary dynamic plasma equilibrium solver", *Fusion Engineering and Design*, vol. 96-97, pp. 664-667, 2015

Increasing the ICRF coupling power by SOL density tailoring with local gas injection on EAST

杨桦、张新军、赵燕平、袁帅、U. Guillaume

中科院合肥物质研究院等离子体所, 合肥 230031

Email: yanghua@ipp.ac.cn

Abstract:

Experiments have been performed on EAST under the proposal of local gas injection on international thermonuclear experimental reactor (ITER), to characterize the increased Ion cyclotron range of frequency (ICRF) antenna loading achieved by optimizing the position of gas injection relative to the RF antennas. The ICRF antennas are installed on I- and B-port on EAST. The injection gas is deuterium from mid-plane inlets. No particular effort is made to keep the central electron density constant. The experiments show that with the gas injection rate increasing from the B-port mid-plane the B-port antenna coupling impedance increases about 40% than without gas injection. The antenna coupling improvement shown in figure 1 is mainly dependent on the local gas injection. An increase in the scrape-off layer (SOL) density was measured when beginning gas injection from outer mid-plane. The experiment results are similar with the results observed on ASDEX and JET [1-2]. Optimized gas injection was also found to reduce impurity content in EAST plasmas with ITER-like tungsten (W) wall. The experiment data strongly support the application of local gas injection on ITER ICRF heating scenario.

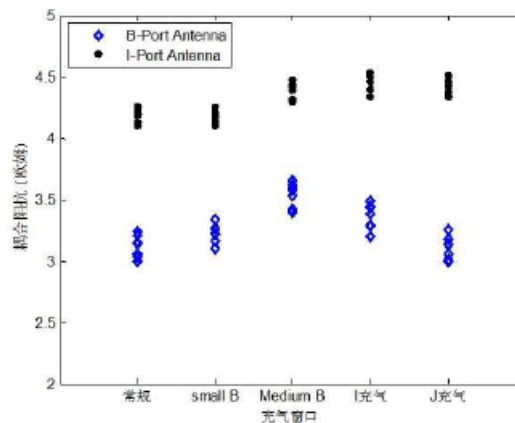


Figure 1. ICRF coupling resistance evolutions during the gas puffing experiments of puffing on B-port at two different rates, I- and J-port.

Reference:

[1] Jacquet P, Bobkov V, Mayoral M L, et al. Nuclear Fusion, 2012, 52(4): 042002.

[2] Lerche E, Goniche M, Jacquet P, et al. Journal of Nuclear Materials, 2015, 463: 634-639.

† This work was supported partly by National key research and development program (2016YFA0400601). This work was also supported partly by the foundation of president of Hefei institutes of physical science, CAS (YZJJ2019QN6).

The optimization of fast vertical position and velocity estimator in EAST

Yuehang Wang¹, Bingjia Xiao^{1,2}, Lei Liu¹, Yong Wang¹, Yong Guo¹, Yao Huang¹

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China

University of Science and Technology of China, Hefei, China

Low-latency, high-quality plasma vertical position and velocity estimation are essential for improving plasma vertical displacement control to achieve maximum confinement and stable operation. The existing vertical position estimator in EAST is designed with the highest precision in mind and without considering the latency and the accuracy with other coils disturbance. In addition, the velocity is given by the derivative of the position, therefore, have a low signal to noise ratio (SNR) which limits the gains for the proportional and derivative (PD) controller. The feasibility of using the loop voltage pairs to provide less noisy velocity signal has been confirmed [1] in EAST. The response model of magnetic probes and loop voltages to plasma displacement and coils which given by a precision model of vacuum vessel and active coils will be introduced, and the model based method of selecting the magnetic probes and loop voltages for vertical position and velocity estimation will be discussed. In addition, the performance of the optimized estimator will be discussed and the comparison will be made between the optimized estimator and the existing estimator by experiment result. Experiment show that the loop voltage signal based estimator has a smaller latency and a higher SNR, and allows larger gains for PD controller.

Reference

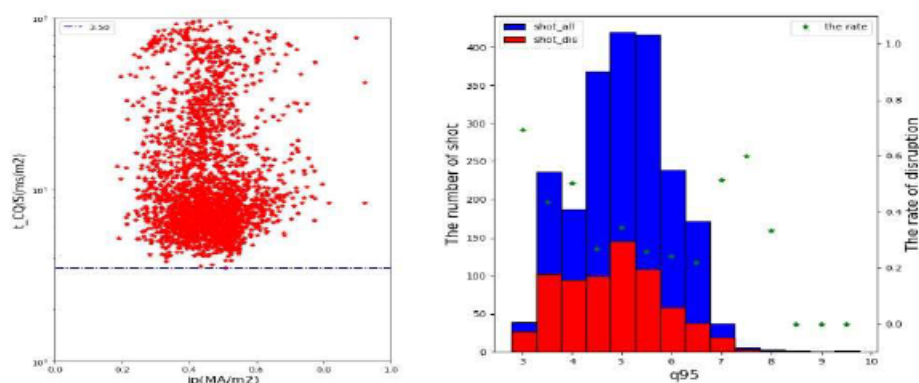
[1] L. Liu, *et al.*, Fusion Engineering and Design, 138, 170-174(2019)

Corresponding author: Y. Wang email address: wangyhplasma@ipp.ac.cn

EAST 装置上破裂数据库发展与安全运行区间拓展研究进展

郭笔豪^{1,2}、沈颀¹、陈大龙¹、Robert Granetz³、孙有文¹、钱金平¹、肖炳甲^{1,2}¹中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031²中国科学技术大学, 合肥 230031³MIT Plasma Science and Fusion Center, Cambridge, MA 02139, USAEmail: bhguo@ipp.ac.cn

摘要: 托卡马克等离子体破裂指的是, 由于一些磁流体不稳定性事件快速发展到不可控或者人为误操作等原因, 导致等离子体在短暂的时间内(时间尺度约为几十毫秒)快速熄灭, 释放等离子体储存的热能和磁能的过程。破裂期间大量热能($\sim \text{MJ}/\text{m}^2$)会沉积到第一壁, 对材料造成热侵蚀; 同时, 破裂期间产生的电压(\sim 百伏)会激发起大量的晕电流与涡流, 与强磁场作用会在内部部件上产生强大的电磁力(\sim 千吨), 直接对装置安全构成了威胁, 阻碍着等离子体参数提高。因此, 等离子体破裂物理的研究以及破裂数据库的建立发展, 对未来聚变装置设计以及等离子体安全运行区间拓展有直接帮助。本次报告主要的研究内容与重要结果如下: (1) 列举了 EAST 装置上常见的几种破裂现象, 并对其基本过程进行了描述, 破裂原因主要包括: 杂质辐射, 垂直不稳定性, 锁模, 密度极限。统计发现, 大部分破裂原因是杂质辐射, 杂质主要来自壁条件变差以及等离子体与天线之间的相互作用(hotspot); (2) 电流猝灭行为的研究, 主要包括: EAST 电流猝灭速率分布与归一化电流猝灭时间, 以及晕电流行为特征等。数据统计发现: 最大电流猝灭速率为 $1.8 \text{ MA}/\text{ms}$, 最小归一化电流猝灭时间为 $3.5 \text{ ms}/\text{m}^2$; 等离子体位移深度与靶板晕电流沉积份额直接相关; (3) 等离子体参数与破裂率的关系。破裂率随着 q_{95} 的增大而减小, 而与拉长比正相反。当 q_{95} 在 $6\sim 7$, 拉长比在 1.6 附近时, 等离子体运较为稳定, 破裂率也就更低; (4) 破裂预警数据库建立, 介绍了哪些诊断信号可用于破裂预测以及每道信号对破裂预测结果的权重等问题;

图1 归一化电流淬灭时间和等离子体电流(左); 不同 q_{95} 下的破裂率(右)

关键词: 托卡马克 破裂 数据库

参考文献

- 【1】 N.W. Eidiētis et al, The ITPA disruption database, Nucl. Fusion, 2015, 55, 063030
- 【2】 R.S. GRANETZ et al, MACHINE LEARNING FOR DISRUPTION WARNING ON ALCATOR C-MOD, DIII-D, AND EAST TOKAMAKS, 27th IAEA Fusion Energy Conference, 2018, EX/P6-20
- 【3】 Chen Da-Long et al, Characterization of plasma current quench during disruption in EAST tokamak, Chinese Phys. B, 2015, 24, 025205

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11805237, No. 11775262, No. 11705239 and No. 11805235) 等

The effects of toroidal equilibrium flow on the stabilization of ballooning modes in tokamaks

Yanqiang Hu^{1,2,3}, Yemin Hu^{1,3,*}, Nong Xiang^{1,3,†} and Yanqing Huang^{1,2,3} and Zhen Zheng^{1,2,3}

1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China,

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China, and

3. Center for Magnetic Fusion Theory,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China.

Abstract

It is well known that plasma rotation may affect the magnetic equilibria and thereby modify the stability properties of the magnetic configuration. In this work the effects of toroidal flow on the ballooning modes of EAST tokamak are numerically investigated using the code BOUT++ coupled with the flow equilibrium. It is found that a toroidal flow with shear can significantly modify the safety factor q profile and pressure gradient ∇P , which then affects the ballooning instability. The growth rate can be reduced when the toroidal flow Mach number $M \geq 0.3$ for a rigid flow. A shear flow can give rise to a stronger stabilization of the ballooning mode even with a smaller Mach number.

*Electronic address: yeminhu@ipp.ac.cn

†Electronic address: xiangn@ipp.ac.cn

激光尾场加速双束电子束及其康普顿辐射研究

吴颖、余昌海、王文涛、刘建胜

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

Email: evelynwy@siom.ac.cn

摘要: 传统的射频加速器由于材料的限制, 其加速梯度只能达到 50-100 MV/m, 而目前等离子体加速器因等离子体中电荷分离产生的超强的电场的加速梯度可达 100 GV/m, 比传统加速器的加速梯度高三个量级, 大大地缩小了加速器的占地面积, 使加速器台式化。经过了几十年的发展, 目前等离子体加速器已经能够在厘米量级范围内产生 GeV 量级的高能电子束, 电子束的能散可压缩至 <1%, 电子束亮度高达 $10^{15} \text{A/m}^2/0.1\%$ 量级。而利用等离子加速器产生的电子束在新型的高能高亮度射线源方面也取得了重大进步, 目前已经可以产生光子能量在 MeV 量级, 亮度高达 $10^{23} \text{photon s}^{-1} \text{mm}^{-2} \text{mrad}^{-2} 0.1\% \text{BW}$ 的射线。这在生物医疗成像, 材料科学, 基础科学研究等方面都起着不可或缺的作用。

课题组团队基于百 TW 超强超短激光驱动级联尾波场电子加速产生高品质电子束的实验平台:

1. 通过优化激光参数与等离子体密度等条件, 在级联激光尾波场中产生了峰值能量在 ~300 MeV, ~210 MeV 的双束电子束, 并采用全光自同步康普顿散射方案通过能谱重建获得了峰值能量在 $(1.07 \pm 0.12) \text{MeV}$, $(0.59 \pm 0.08) \text{MeV}$ 的双色 γ 射线。通过模拟发现两团电子束分别是通过自注入和密度注入方式联合注入空泡并加速。最后对康普顿散射的 γ 射线能谱特性进行了理论和模拟的分析研究, 理论分析和模拟结果与实验都相吻合。

2. 通过优化激光条件, 等离子体密度, 调节等离子体长度, 实现了激光驱动和电子束驱动的混合型尾波场加速过程, 使电子束能量得到增强并压缩了电子束能散。在实验中调节等离子体长度获得了不同能量的双束电子束, 并且当等离子体长度大于泵浦损耗长度时, 其中一束电子束仍被加速至 640.7 MeV, 并且其 FWHM 能散被压缩至 1.1%, 而另一束电子慢慢失去能量至 230.5 MeV, FWHM 能散约 50.3%。模拟验证了这一混合型过程的存在, 并表明当激光泵浦损耗后, 激光驱动尾场加速渐渐弱化, 慢慢地转变成电子束驱动的尾波场加速, 并且在后期的加速过程中电子束驱动尾波场占主导。另外模拟还表明混合型的尾波场加速不仅能提高电子的能量, 而且还能在电子束驱动尾波场阶段使能量啁啾再次反转, 通过啁啾补偿窄化电子束的能散。

关键词: 激光尾场加速器, 双束电子束, 康普顿散射, 双色 γ 射线, 电子束驱动尾波场加速, 能量啁啾调制

参考文献

- 【1】 Y. Wu *et al.*, Dual-color γ -rays via all-optical Compton scattering from a cascaded laser-driven wakefield accelerator, *Plasma. Phys. Control. Fusion* 2019, 61, 085030.
- 【2】 Y. Wu *et al.*, Energy enhancement and energy spread compression of electron beams in a hybrid laser-plasma Wakefield accelerator. *Appl. Sci.* 2019, 9(12), 2561.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 11127901, 11425418, 11875065), 上海战略重点研究项目 (NO. XDB16), 上海自然科学基金项目 (NO. 18JC1414800, 18ZR1444500), 上海扬帆项目 (NO. 18YF1426000) 等。

超高剂量等离子体辐照钨中的氘滞留研究

王军^{1,2}、程龙²、郭望果²、刘秘²、袁悦²、吕广宏²

中山大学物理学院, 广州 510275

北京航空航天大学物理学院, 北京 100191

Email: wangi699@mail.sysu.edu.cn

摘要: 聚变堆偏滤器部位壁材料钨将长期承受高束流氘等离子体辐照, 高累积剂量 ($10^{31}/\text{m}^2/\text{年}$) 下钨中损伤及燃料氘滞留问题将严重制约反应堆的安全稳定运行。目前研究主要集中在低剂量辐照实验, 结果表明氘滞留主要由近表层捕获决定, 钨中氘滞留随着剂量增加而逐步上升。然而, 长时间高剂量下氘将向钨体内扩散, 块体捕获效应凸显, 近表层损伤对氘扩散、捕获等行为的作用将显著影响钨中总氘滞留。研究超高剂量等离子体辐照钨中的氘滞留行为, 找出氘滞留随剂量增加的变化规律对于未来聚变堆壁材料的稳定服役具有重要意义。

我们利用高束流等离子体产生装置 Magnum-PSI 对再结晶钨样品进行了氘等离子体辐照实验。氘等离子体束流密度 $\sim 10^{24}/\text{m}^2 \text{ s}$, 离子能量 20 eV, 剂量为 $10^{26-29} \text{ D}/\text{m}^2 \text{ s}$, 样品表面温度控制在 500 K 左右。利用核反应分析及热脱附谱仪对辐照钨中氘深度分布和滞留行为进行分析。结合速率理论程序 TESSIM 模拟钨中氘注入和脱附的过程。

实验结果表明, 再结晶钨样品中近表层 ($\sim 4 \mu\text{m}$) 氘浓度随着辐照剂量的增加而上升, 并逐渐呈现饱和趋势。低剂量时, 近表层的氘与样品中的总氘滞留量相近 (占比 $\sim 85\%$)。随着剂量的升高, 近表层氘捕获对总体氘滞留量贡献逐渐减小, 从占比 $\sim 85\%$ 下降到了 15% 左右。钨样品体内氘捕获对总体氘滞留的贡献增大。再结晶钨中氘总滞留量随着剂量的增加逐渐增大, 并最终达到饱和。以上结果说明, 随着氘注入剂量增大, 近表层氘浓度逐渐饱和, 氘向内部扩散, 体内缺陷被逐渐占据, 氘滞留最终饱和。

基于以上结果, 超高剂量下氘在钨中的滞留主要由钨样品体内的捕获决定, 并且随着钨体内的缺陷被逐渐填满, 氘滞留最终会达到饱和。

关键词: 聚变 超高剂量 钨 氘滞留

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 5171001050)、国家留学基金

激光质子加速器中发射度测量研究

林晨、吴旻剑、朱军高、李东彧、杨童、耿易星、廖庆、徐筱菡、寿寅任、
马文君、卢海洋、赵研英、朱昆、颜学庆、陈佳洱
北京大学 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871
Email: wmj111728@pku.edu.cn

摘要: 激光加速离子束由于其脉冲短 (ps)、源尺寸小 (μm) 等特性在材料物理、离子成像、快点火、温稠密物质的产生等领域存在巨大的应用潜力。同时由于激光加速离子束大能散 (100%) 和大发散角 ($\pm 10^\circ$) 的特性, 适当的传输和控制 在应用中是 必不可少的。发射度作为束线系统中衡量束流聚焦和传输品质的重要参数, 在束线设计和运行中束流发射度的测量和监测起着重要的指导作用。利用微结构靶【1】测量得到激光加速离子束的归一化均方根发射度在 $0.004\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 量级, 但是由于微结构靶对靶材的物理特性和厚度有一定要求且对鞘场存在调制, 不适合作为激光加速束线系统中的长期发射度测量和监测方法, 同时不同的激光系统和靶材发射度差距很大【2】, 不同系统参数下发射度需要实时测量。

北京大学超小型激光离子加速器 (Compact LAser Plasma Accelerator, CLAPA) 系统成功出束, 获得 3-9MeV, 能散 <1% 的稳定离子束。基于此, 在 CLAPA 束线系统的不同探测位置利用胡椒板法、透镜扫描法和单发发射度测量等方法分别测量了不同位置的发射度, 首次发现了激光加速离子束在传输和漂移过程中的发射度增长现象, 与 CST 模拟结果吻合较好, 充分证实了激光加速离子束的可用性。并且首次成功利用单发发射度测量实现激光加速离子束的准实时发射度测量。

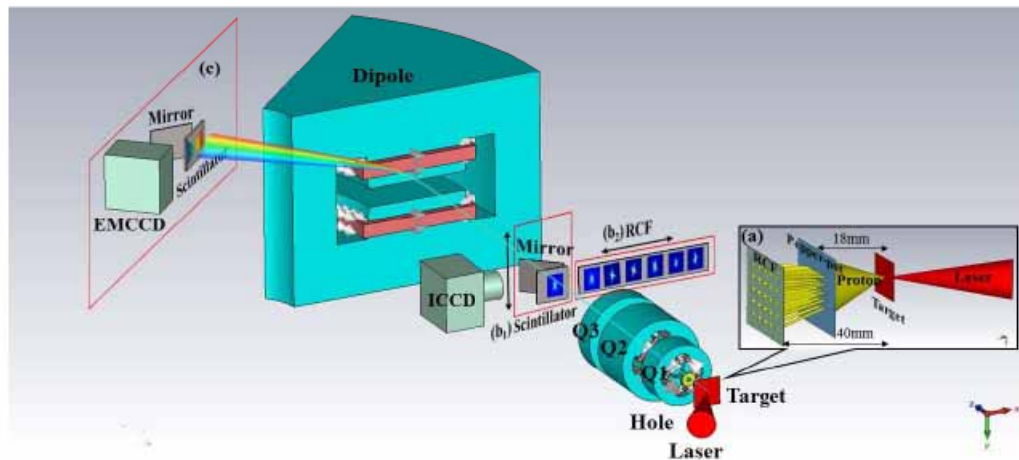


图 1 CLAPA 系统发射度测量实验设置 (a) 胡椒板法 (b) 透镜扫描法 (c) 单发发射度测量

关键词: 激光离子加速、发射度、胡椒板、透镜扫描

资助项目: 中国国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013cba01502)、中国自然科学基金 (批准号: 11475010, 11575011, 11535001)、磁约束聚变专项 (2015GB120001) 和国家大仪器项目 (2012yq030142)

- 【1】 Cowan T E, et al. Physical Review Letters, 2004, 92(20): 204801.
【2】 Nürnberg F, et al. Review of scientific instruments, 2009, 80(3): 033301.

ITER 偏滤器探针诊断系统进展

聂林、赵伟、钟光武、金羽中、王雅丽、赵丽、周红霞等

核工业西南物理研究院

国际热核聚变实验堆 ITER 是目前正在建设，即将成为全球最大的、用于展示和平利用核聚变能的科学和工程研究托卡马克，同时也是目前最具挑战性的科学探索之一。根据 ITER 装置等离子体的诊断要求，需要数几十个诊断设备参与，偏滤器朗缪尔探针系统属于其中一个，用于测量偏滤器靶板附近的等离子体参数以满足相关的物理研究和装置的高级控制。对于托卡马克的高级控制，探针系统需要提供一个信号指示等离子体在偏滤器靶板是处于脱靶或触靶的状态；而对于物理研究，则需要提供更多更细致的测量结果。探针系统包括三个部分：1、安装在靶板侧面的探针，用于收集等离子体电流，通过探针的结构设计和模拟仿真，得到了探针在 $10\text{MW}/\text{m}^2$ 稳态热负载条件下的温度和应力分布，探针和屏蔽结构初步确定选用锻造钨材料，并开展了机加工工艺、焊接工艺等方面的研究；2、电子学系统由电源、模式切换和信号调理单元组成，用于操作和驱动探针系统工作在不同的诊断模式，电源相关技术验证开发正在进行；3、测控系统的功能包括下发配置、状态监控、校准、数据采集、与 ITER CODAC 通讯、实时测量偏滤器靶板离子流量。

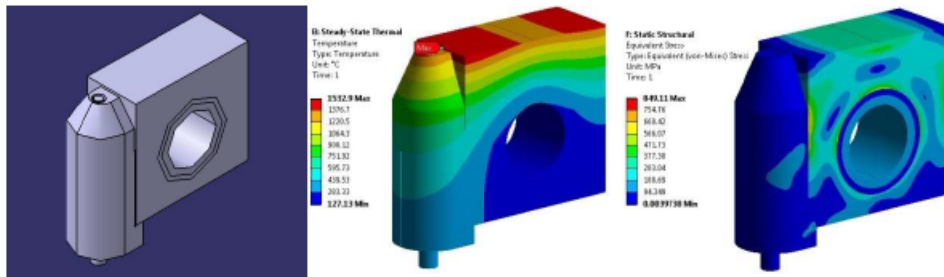


图1 探针设计与分析

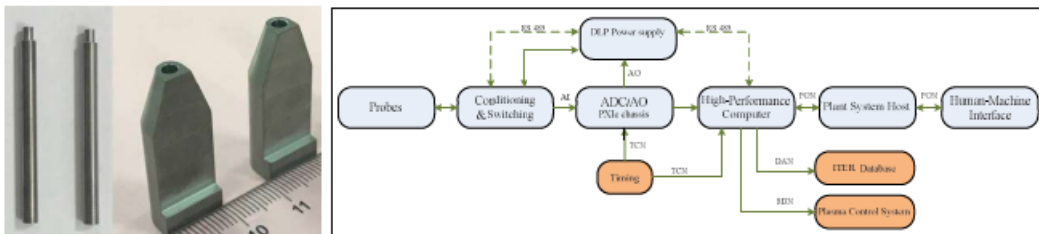


图2 探针部件

图3 探针系统信号流程图

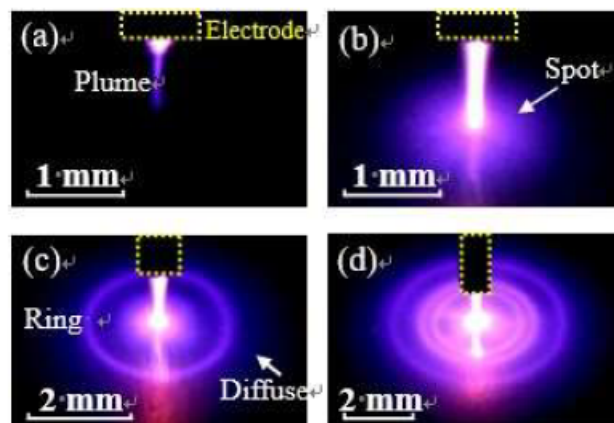
射流与基底作用中的沿面放电斑图 及流光传播行为的实验研究

吴凯玥, 任晨华, 贾博宇, 贾鹏英, 李雪辰

河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002

Email: plasmalab@126.com

摘要: 因其能产生开放空间的等离子体羽, 大气压等离子体射流在材料表面改性, 生物医学, 污染物处理等方面都具有良好的应用前景^[1,2]。在实际应用中, 被处理材料(基底)与射流之间的相互作用是不容忽视的, 因此有必要对其相互作用进行研究。射流产生的等离子体羽和介质基底接触, 会在其表面产生沿面放电斑图。随着外加电压的增加, 沿面放电斑图由弥散点斑图发展成单环斑图, 最终形成三环斑图。各斑图的中心存在一个亮点, 且伴有亮度均匀的发光背景, 分别被称为中心点和弥散背景。对各斑图的电学特性进行研究, 发现单个周期存在多个正电流脉冲, 且其数量随斑图的形态发展不断增加; 但对于任一斑图而言, 负电流脉冲都仅有一个。快速照相表明, 这些沿面放电斑图是由正、负流光经时间叠加形成的。对上述任何一个斑图而言, 沿面负流光都是弥散的, 而沿面正流光则存在复杂的传播行为。每电压周期的第一个正电流脉冲对应长度较短的, 沿径向传播的, 对称分布的正流光。这些正流光经过时间叠加后可形成各斑图的中心点。每电压周期的最后一个正电流脉冲对应长度较长的正流光。其在较低的外加电压峰值下沿径向直线传播, 在较高的外加电压峰值下存在随机分叉行为。这些正流光经过时间叠加构成各斑图的弥散背景。其余的正电流脉冲对应的正流光也存在分叉行为。当其从中心传播至特定距离时, 正流光分叉并沿圆弧轨迹传播。斑图中的“环”结构就是由这些正流光叠加形成的。最后, 结合我们之前的工作^[3,4], 通过分析外加电场, 残余电荷以及空气渗透的影响, 定性解释了正流光复杂的传播行为。这些结果及理论分析对更好的了解射流与基底的相互作用, 沿面正流光的传播机制具有重要意义。



关键词: 等离子体射流, 斑图, 沿面放电, 流光, 快速照相

参考文献:

- [1] Lu *et al*, Guided ionization waves: Theory and experiments, *Phys. Rep.* 2014, 540, 123-166.
- [2] Lu *et al*, Guided ionization waves: The physics of repeatability, *Appl. Phys. Rev.* 2018, 5, 031102.
- [3] Li *et al*, Improved performance of a barrier discharge plasma jet biased by a direct-current voltage, *Sci. Rep.* 2016, 6, 35653.
- [4] Li *et al*, Plume transition from solid to hollow with increasing the bias value of a sinusoidal voltage applied to an argon plasma jet, *Plasma Process. Polym.* 2018, 15, 1700224.

致谢: 国家自然科学基金(批准号: 11575050, 11875121, 10805013)、中西部高校综合实力提升工程资助项目、河北省自然科学基金(批准号: A2016201042)、河北省教育厅科研基金(批准号: SLRC2017021)、河北省 333 人才工程(批准号: A2016005005)和河北省研究生创新基金项目(批准号: CXZZSS2018003)。