

我国受控核聚变的新进展

——在 HL-1 托卡马克上用偏压电极实现 H 模运行

冉利波

(核工业西南物理研究院,成都 610041)

托卡马克是当前世界实现受控核聚变的主要途径。在 HL-1 托卡马克(中国环流器一号)上用偏压电极实现了从低约束模(L模)到高约束模(H模)的转换,研究了外加径向电场对这种转换的作用及等离子体性质的变化。此工作是我国核聚变研究的新进展和重要成果。该文简要地介绍了此项研究工作的物理内容和意义。

Abstract

The H mode has been induced by the biased electrode on the HL-1 Tokamak. The L-H transition takes place and related phenomena in the plasma are observed. The time scale of the reduction of the edge parameters is much faster than the time scale of the changes of the global parameters, indicating that the L-H transition starts at the plasma edge and gradually develops into the plasma center. To access the H mode the electrode current plays an important role. A theory of the H mode induced by the biased electrode has been developed which agrees fairly well with the experimental results.

托卡马克是当前实现受控核聚变的主要途径。托卡马克运行有两种主要的约束模式:一种是高约束模式,简称H模;另一种是低约束模式,简称L模。由于H模的能量约束时间比L模高出好几倍,因而核聚变研究人员都力求使各自的托卡马克运行在H约束模式。H模也是未来托卡马克聚变堆优选的约束模式。这就使

对H模及 L-H 转换的研究成为当今世界上托卡马克研究的重大热门课题之一。

H模是1982年在联邦德国的托卡马克 Asdex 上发现的。其主要特征是,当加热功率超过一定阈值时,等离子体边缘的 D_α 线辐射强度突然下降,等离子体密度明显增加,粒子及能量约束明显改善。H模已在当今世界上一些

形。可以说,即使集成电路的层数增加,也不必增加主要加工设备的数目。此外,同一套装置还可以制作出所有结构的集成电路,一层接一层地以小批量的方式制出。利用“小批量生产”方式所建立的生产线的费用可从2000万美元下降到200—300万美元。使用非破坏性的X射线显微镜来监测临界尺寸的主要优点是减小了批量。批量的减小不仅缩短了生产周期,而且降低了费用,也可增加集成电路的种类。像电子束车间一样,可能大量生产。另外,X射线

制备工艺对环境的洁净程度的要求也较低。

总之,Nanodynamics公司已发展了或正在发展以下技术:(1)分子三极管工艺;(2)俄歇制版工艺;(3)X射线显微镜;(4)X射线分步扫描;(5)可选波长的聚焦X射线源。

Nanodynamics公司乐于全力投入集成电路的工艺革新和发展令人振奋的小批量生产过程。

(中国科学院物理研究所 解思深译)

托卡马克装置上进行了广泛深入的研究。实验证明H模与加热方式及约束位形无关,是托卡马克等离子体的固有特性。然而L-H转换的物理机制却不清楚,这方面的研究工作只是近年来才有一些进展。在DIII-D^[1]和Asdex^[2]等装置上测出了等离子体边缘的极向旋转速度 v_θ 和径向电场 E_r ,发现L-H转换时 v_θ 突然增加, E_r 值变得更负, $\partial E_r/\partial r$ 值变得更正。同时有关L-H转换的新理论也相继出现^[3,4]。这些理论的基本思想是等离子体边缘旋转速度及径向电场,特别是它们剪切力突然增加,使边缘扰动得到抑制,约束得到改善,导致了L-H转换。在DIII-D和Asdex装置上,等离子体极向旋转速度及径向电场的变化都是由等离子体自发产生的。在CCT^[5]和TEXTOR^[6]装置上,用插入等离子体中的偏压电极改变了等离子体边缘的径向电场,驱动了等离子体极向旋转,进一步证实了径向电场及极向旋转对L-H转换的作用,成功地实现了H模的主动控制。

最近,在HL-1托卡马克(中国环流器一号)上用偏压电极改变了等离子体边缘径向电场,也成功地实现了L-H转换,诱发出了H模。此电极由一个石墨头和一个陶瓷绝缘段构成。电极头部越过活动孔栏2—5cm插入等离子体内。在欧姆放电的平顶段,对电极施加一个相对于真空室为0—600V的脉冲电压(脉宽为100ms)。装置运行参数为:等离子体电流 $I_p = 80\text{—}100\text{ kA}$,磁场 $B_t = 2.2\text{—}2.6\text{ T}$,密度 $\bar{n}_e = (0.2\text{—}2.0) \times 10^{13}/\text{cm}^3$,工作气体为氢和氖。工作时采用反馈控制位移和程序送气的方法。

当电极插入等离子体超过活动孔栏2cm、电极偏压超过约350V和电极上的电流超过一定的阈值时,H模能被诱发。其特性为: D_α (或 H_α)线辐射强度突然下降,等离子体线平均电子密度 \bar{n}_e 逐步增加,由静电双探针及静电三探针测得的饱和离子流 I_s 明显下降,等离子体边缘密度 n_{e0} 迅速下降,边缘密度衰减的特征长度由未加偏压时的~14mm减小到加偏压时的~4mm,表明密度分布变陡。从以上测量可

以估计出粒子横越磁场时,扩散系数减小到原来的1/2—1/4,因而粒子约束时间增加了1—3倍。等离子体中心电子温度 $T_e(0)$ 由汤姆孙散射仪测量,其结果表明,在进入H模后, $T_e(0)$ 增加了20—30%,而由静电探针测出的边缘温度 T_{e0} 明显下降,这表明温度分布变陡。边缘温度及密度分布的变陡,说明能阻止沿径向向外的热流和粒子流的输运壁垒已经形成。静电探针及米尔诺夫(Mirnov)线圈的测量结果表明,L-H转换时静电扰动及磁扰动都得到了抑制。当工作气体为氖时,静电扰动幅度被抑制了70—80%。磁扰动的抑制有两种类型:一种是逐步地被抑制;另一种是突然地被抑制。装置外侧(弱场边)扰动被抑制的幅度要大于内侧(强场边)扰动被抑制的幅度。这表明偏压对弱场一侧的作用要大于对强场一侧的作用,因而弱场一侧输运的减少要大于强场一侧输运的减少。扰动的减小使粒子扩散损失及热传导损失减小,因而约束得到改善。反磁测量表明,发生L-H转换时反磁磁通增加了1—3倍,即能量约束时间增加。然而与此同时,氧、碳、铬、镍、钼等杂质谱线和硬X射线以及等离子体辐射损失也明显增加,表明等离子体中杂质及杂质引起的辐射损失明显增加。这导致了约束的蜕化。其明显的特征是,在等离子体进入H模约40—50ms后,反磁磁通明显减少,静电扰动幅度明显增加。

发生L-H转换时边缘参数(如边缘密度、边缘温度、静电扰动、悬浮电位等)变化的时间尺度为200—300 μs ,而整体参数(如线平均电子密度 \bar{n}_e ,反磁磁通等)变化的时间尺度约为20—40ms,比边缘参数的变化慢得多。这和DIII-D^[1]的实验结果一致。等离子体边缘参数变化的时间尺度和理论预言^[3—5]一致。这一结果表明,L-H转换是从等离子体边缘开始向中心发展的。

电极电流在L-H转换中起着重要作用。只有当电极上的电流超过一定阈值时才能发生L-H转换。这个阈值对氖等离子体大约是30A,对氢等离子体大约是40A。电极电流主

超高压氢的绝缘—金属相变及光学测量技术

徐丽雯

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

应用金刚石压砧高压室(DAC)研究氢在百万大气压以上的超高压的绝缘—金属相变是物理学的重大课题之一。正确判断DAC中微米量级大小的样品的能级状态随压力的变化是一个难度很大又极为重要的问题。对目前金属氢研究中用到的一些光学测量技术(X射线和同步辐射实验除外)作了简单介绍,并对超高压DAC实验的特殊困难叙述了自己的看法。

Abstract

Studies on hydrogen using high pressure diamond-anvil cell (DAC) technology has become a fascinating subject of modern physics. The accurate measurement of dielectric properties is required for a successful determination of possible changes from the insulating to the metallic phase. The most direct and convincing evidence for this transition would be a dc resistance measurement. Unfortunately, this has not yet been carried out in a DAC above 100 Gpa due to technical difficulties. However, optical studies involving absorption, reflectivity, dispersion and scattering have been performed to characterize the state of pressurized hydrogen up to 250 Gpa. A transition near 150 Gpa has been observed but the metallization of hydrogen remains an open question.

科学要求人们一步一个脚印地攀登“高峰”同时也要求人们具有充满活力的丰富的科学幻

想。几十年前一些科学家幻想着用挤压的办法把氢变成金属,今天它果然成了几个国际著名

要是径向电流,它驱动等离子体极向旋转。电极电流需要超过一定阈值,说明等离子体旋转速度需要超过一定阈值,才能发生L-H转换。

L-H转换存在着同位素效应。在HL-1托卡马克上,已观察到如下现象:氘等离子体L-H转换的阈值电流低于氢等离子体的;氘等离子体发生L-H转换的密度高于氢等离子体的;L-H转换时氘等离子体的边缘温度与密度比氢等离子体的要下降得多些,即氘等离子体的边缘温度与密度分布比氢等离子体的更陡;发生L-H转换时,氘等离子体扰动被抑制的幅度比氢等离子体扰动被抑制的幅度更大。所有这些说明,在氘等离子体中比在氢等离子体中更容易诱发H模。

有关用偏压电极诱发L-H转换的理论已被提出来了^[7]。由此理论得出的若干重要结论与CCT^[2]和TEXTOR装置^[6]以及本文所述的实验结果都符合得很好。

感谢王恩耀研究员和邱孝明研究员对本文提出许多宝贵的修改意见。

- [1] J. Groebner et al., Proc. 16th EPS Conf., Part I, Venice, Vol. 13B, (1989), 123.
- [2] A. R. Field et al., Proc. 18th EPS Conf. Part III, Berlin, Vol. 15C, (1991), 113.
- [3] K. C. Shaing et al., Phys. Rev. Lett., 63(1989), 2369.
- [4] H. Biglari et al., Phys. Fluids B, 2(1990), 1.
- [5] R. J. Taylor et al., Phys. Rev. Lett., 63(1989), 2365.
- [6] R. R. Weynants et al., Proc. 17th EPS Conf., Part I Amsterdam, Vol. 14B, (1990), 287.
- [7] X. M. Qiu et al., Chinese Phys. Lett., 9(1992), 527.