

# 低杂波电流驱动下HT-7超导托卡马克 等离子体硬X射线辐射研究

846-850

石跃江 凌必利 万宝年 丁伯江  
(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

T2631.24  
0536

**摘要** 用7个NaI(Tl)闪烁探测器组成的阵列观测能量范围在20—500keV, 来自HT-7托卡马克等离子体的硬X射线韧致辐射。实验结果显示, 硬X射线的径向辐射强度分布与低杂波的功率谱和等离子体的密度及磁场强度等放电参数密切相关。通过测量不同放电参数下硬X射线的径向强度分布, 研究低杂波在等离子体中传播和吸收机制。

④ **关键词** 托卡马克, 硬X射线, 低杂波电流驱动, NaI(Tl)闪烁探测器  
**中图分类号** O536, O532

韧致辐射 硬X射线辐射

托卡马克连续稳定的运行是建立具有实用价值聚变堆的前提条件。由于受变压器伏秒数的限制, 仅靠变压器产生的环电压维持等离子体电流只能是短暂的脉冲。因此, 在70年代初国际上广泛开展了各种类型的非感应电流驱动实验。其中根据Fisch提出的理论<sup>[1]</sup>开展的低杂波电流驱动(LHCD)在HT-7和很多托卡马克<sup>[2-5]</sup>上取得了重大成果和进展, 是非常有效和有希望的电流驱动方式。

低杂波通过朗道阻尼与等离子体相互作用产生高能共振电子维持等离子体电流, 而高能电子总要通过韧致辐射(复合辐射相对占的比例很小<sup>[2]</sup>)发出相应能段的硬X射线。因此通过测量沿托卡马克小环截面的硬X射线辐射强度的分布, 可以直观地反映低杂波能量的沉积, 加深我们对低杂波与等离子体相互作用机制的理解。

我们用7个NaI闪烁探测器组成阵列在HT-7托卡马克的水平窗口, 沿垂直磁轴的方向测量小环截面等离子体硬X射线辐射。实验结果显示, 硬X射线径向强度分布与低杂波的功率谱和托卡马克等离子体的放电参数有密切关系。

## 1 实验装置与诊断设备

HT-7超导托卡马克有关参数为:纵场 $B_t = 2\text{T}$ , 大半径 $R = 122\text{cm}$ , 小半径 $a = 30\text{cm}$ 。它的低杂波射频波源有12个速调管, 每管子额定功率100kW, 频率2.45GHz。整个低杂波系统的最大功率1.2MW。波被 $2 \times 12$ 普通GRILL结构的慢波波导天线注入等离子体。通过调节波导间的相位差角 $\Delta\Phi$ , 获得不同的功率谱 $P(N_r)$ , 以达到波和等离子体的最佳耦合。图1为HT-7低杂波天线系统的Brambilla功率谱。

低杂波要在等离子体中传播吸收, 天线辐射波的平行折射率必须满足可接近性条件<sup>[1]</sup>, 即 $N_{\parallel} > N_{\parallel \text{acc}}$ , 而

收稿日期:1999-12-29, 修回日期:2000-07-05

$$N_{||acc} = \omega_{pe} / \omega_{ce} + [1 + (\omega_{pe} / \omega_{ce})^2 - (\omega_{pi} / \omega)^2]^{1/2}$$

式中,  $\omega_{pe} = (n_e e^2 / m_e \epsilon_0)^{1/2}$ ,  $\omega_{ce} = eB / m_e$ ,  $\omega_{pi} = (n_i e^2 / m_i \epsilon_0)^{1/2}$ .

对  $N_{||acc}$  起决定作用的是电子密度  $n_e$  和磁场强度  $B$ , 而  $\omega_{pi} \ll \omega_{pe}$ , 离子对  $n_i$  和  $N_{||acc}$  没有影响。

7 个 NaI(Tl) 闪烁探测器组成的硬 X 射线测量阵列见图 2。从图 2 可见, 探测器阵列是通过一个水平窗口观测小环截面等离子体的硬 X 射线辐射。探头自下而上平行排布, 探头间隔 7cm, 观测范围从 -21—21cm。为了屏蔽高能电子打在限制器和真空室壁发出的杂散硬 X 射线的干扰, 整个阵列放在一个 15cm 厚的铅室中。同时, 为了消减托卡马克的磁场对光电倍增管的影响, 探头都裹有坡莫合金。每个探头的光路经过孔径  $\phi = 10\text{mm}$  的准直系统的严格准直。窗口法兰通光处是 500  $\mu\text{m}$  厚的铍窗, 用来阻挡低能射线。探头用  $\phi 40\text{mm} \times 40\text{mm}$  的 NaI(Tl) 晶体, 晶体对能量在 500keV 以下的射线几乎全部吸收。测量系统用  $^{152}\text{Eu}$  放射源标定。

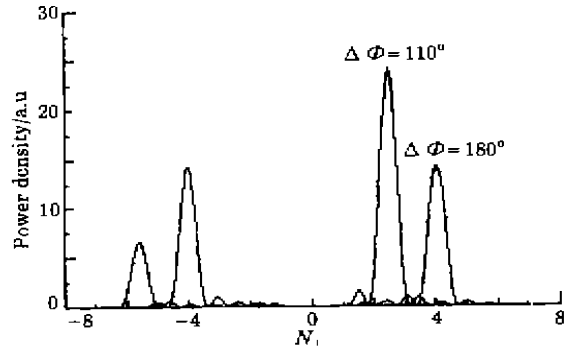


图 1 HT-7 低杂波天线系统的 Brambilla 功率谱  
Fig.1 The bremsstrahlung  $N_{||}$  fourier spectrum for the HT-7 waveguide array

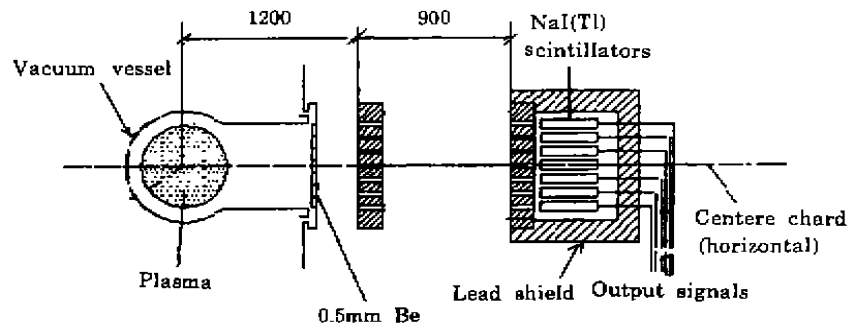


图 2 NaI(Tl) 闪烁探测器组成的硬 X 射线测量阵列  
Fig.2 Schematic diagram of the NaI(Tl) scintillator array

## 2 结果和讨论

HT-7 托卡马克低杂波放电波形如图 3 所示。功率约 300kW 的低杂波在等离子体被击穿 250ms 后投入, 低杂波维持时间大约 300ms 左右。在加波前后, 等离子体密度  $n_e$ 、位移  $\Delta$  和有效  $Z_{eff}$  都很平稳, 加波后来自等离子体的硬 X 射线辐射通量显著增加, 环电压  $V_{loop}$  从加低杂波前的  $\sim 2.0\text{V}$  降到加波期间的  $\sim 1.0\text{V}$ 。在低杂波撤去后, 硬 X 射线信号突然跳起, 可能是部分高能电子在失去低杂波的约束后, 被环电压继续加速到更高能量而逃逸。从同时测量的硬 X 射线能谱也可以看出, 加波前硬 X 射线的计数相对加波后的计数非常小, 能量低于 20keV 的 X 射线被铍窗强烈衰减, 计数很少, 而能量高于 150keV 的射线计数也很小, 说明

硬X射线基本上是低杂波驱动的高能电子发出的。

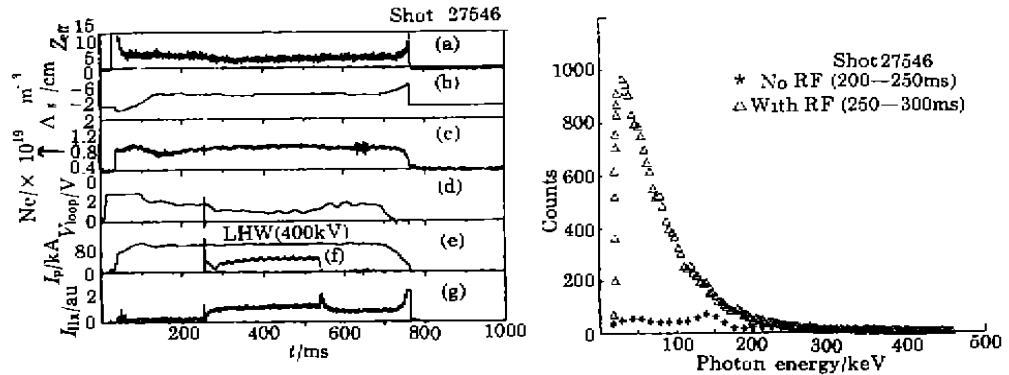


图3 HT-7低杂波电流驱动的放电波形和加波前后硬X射线能谱  
(a) 有效电荷  $Z_{eff}$  (无量纲单位), (b) 水平位移  $\Delta_s$ , (c) 电子密度  $N_e$ , (d) 环电压  $V_{loop}$ , (e) 等离子体电流  $I_p$ , (f) 低杂波功率LHW, (g) 中心道硬X射线强度  $I_{HX}$

Fig.3 Waveforms of LHCD discharge on HT-7

(a) Effective charges  $Z_{eff}$ , (b) Horizontal displacement  $\Delta_s$ , (c) Line average density  $N_e$ , (d) Loop voltage  $V_{loop}$ , (e) Plasma current  $I_p$ , (f) Power of LHW, (g) Hard X-ray intensity

在相同的等离子体放电参数下 ( $N_e = 1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $B_t = 1.9 \text{T}$ , 低杂波功率  $P_{LH} = 320 \text{kW}$ ),  $\Delta \Phi = 110^\circ$  ( $N_{V \text{ peak}} = 2.65$ ) 和  $\Delta \Phi = 180^\circ$  ( $N_{V \text{ peak}} = 4.35$ ) 加低杂波平稳阶段的硬X射线三维分布见图4。从图4可以看出,  $\Delta \Phi = 110^\circ$  的硬X射线分布比较峰化, 主要集中在  $r/a < 1/2$  的等离子体内部, 表明低杂波传播到这个部位并将大部分能量主要沉积在此, 而  $\Delta \Phi = 180^\circ$  的硬X射线分布比较平坦, 表明低杂波在等离子体的传播过程中, 在等离子体外部 ( $r/a > 1/2$ ) 就已经与等离子体强烈作用, 到了等离子体芯部, 低杂波的能量已经消耗完, 即低杂波的功率没有在等离子体芯部沉积。

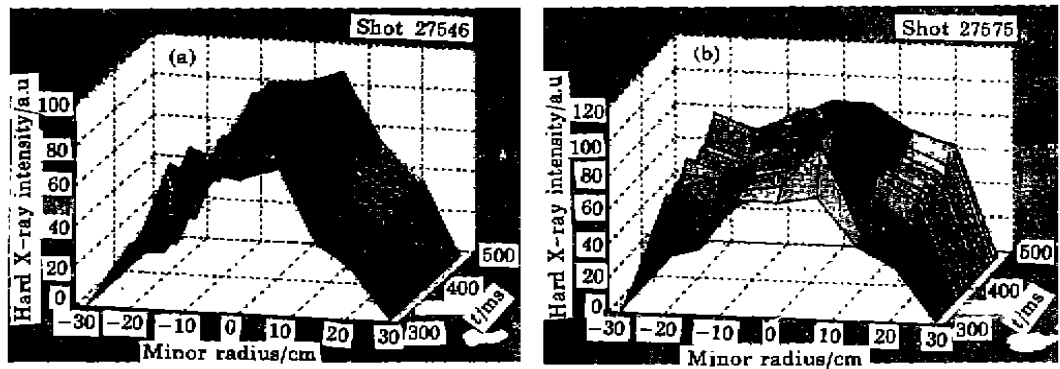


图4 不同相位差角的LHCD实验的硬X射线径向强度分布

Fig.4 The hard X-ray radial distribution at different  $\Delta \Phi$  which is  $110^\circ$  in (a) and  $180^\circ$  (b)

图5为准线性理论计算的  $\Delta \Phi = 110^\circ$  和  $\Delta \Phi = 180^\circ$  的低杂波在等离子体中的功率沉积径向分布。从图5可以看出, 实验结果反映了理论计算的趋势。

图6为不同密度下做LHCD实验的硬X射线径向分布。和图4一样, 两次放电保持相同的条件:  $B_t = 1.9 \text{T}$ ,  $P_{LH} = 400 \text{kW}$ ,  $\Delta \Phi = 110^\circ$  ( $N_{V \text{ peak}} = 2.65$ )。从图6中不难观察到, 在等离

子体中心电子密度  $N_{e0}$  等于  $1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  时的硬 X 射线分布比较峰化, 而在  $N_{e0}$  达到  $3.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  时, 硬 X 射线分布比较平坦。这种现象符合低杂波的可接近性条件。等离子体密度较低时,  $N_{\parallel acc}$  相应较低, 低杂波功率谱中的大部分能满足可接近性条件, 波比较容易传播到等离子体芯部, 而将能量沉积于此。而当等离子体密度较高时,  $N_{\parallel acc}$  随之变大。功率谱的相当大的一部分波不能满足等离子体芯部的可接近性条件, 而将能量沉积在密度较低的等离子体外部。

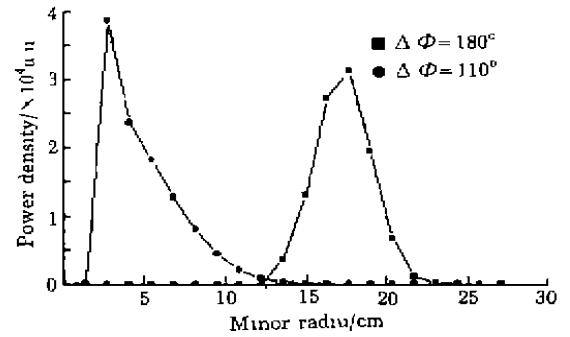


图5 准线性理论计算的低杂波功率沉积分布  
Fig.5 Predicted power deposition profile of LHW calculated by quasi-line theory

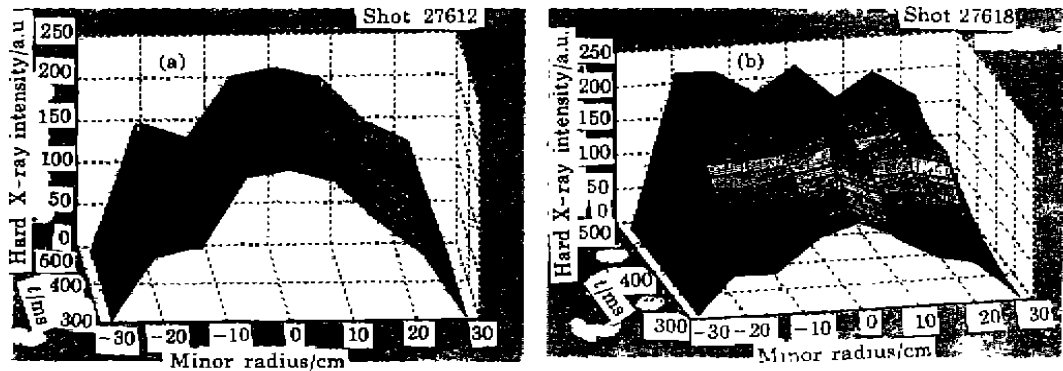


图6 不同电子密度下的硬 X 射线径向强度分布

(a)  $N_{e0} = 1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , (b)  $N_{e0} = 3.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

Fig.6 The hard X-ray radial distribution at different electron density

图7为不同纵向磁场强度  $B_t$  下 LHCD 实验硬 X 射线的分布。除了磁场强度以外, 主要的

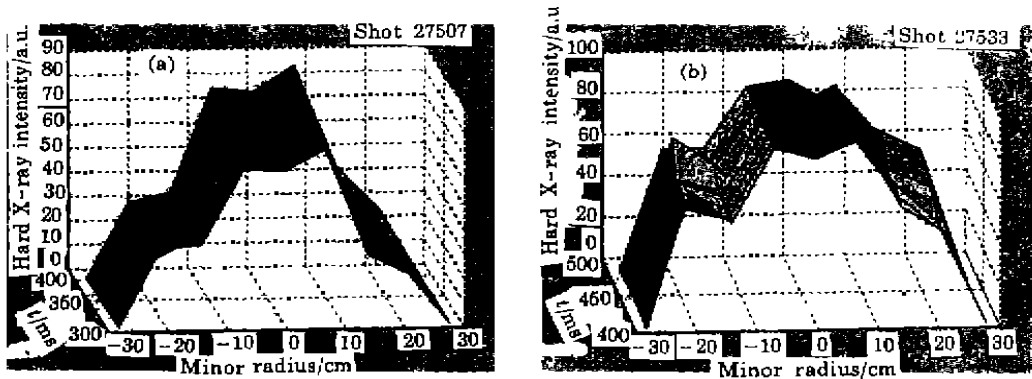


图7 不同纵场强度下的硬 X 射线径向强度分布

(a)  $B_t = 2.0 \text{T}$ , (b)  $B_t = 1.6 \text{T}$

Fig.7 The hard X-ray radial distribution at different toroidal magnetic field

放电参数都相同:  $N_e = 1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $P_{\text{LH}} = 300 \text{ kW}$ ,  $\Delta \Phi = 110^\circ (N_{\parallel \text{ peak}} = 2.65)$ 。实验结果也同样符合低杂波的可接近性条件。在  $B_t$  较高时,  $N_{\parallel \text{ acc}}$  较小, 低杂波很容易传播到等离子体芯部, 驱动出高能电子。  $B_t$  变低,  $N_{\parallel \text{ acc}}$  随之变大, 低杂波谱中的低  $N_{\parallel}$  部分不能满足可接近性条件, 在磁场较弱的边缘部位被等离子体吸收。

### 3 结论

通过7道 NaI(Tl)探测器阵列测量来自等离子体的硬X射线韧致辐射的径向分布, 可以从实验上比较直观地反映 LHCD 时低杂波的能量沉积分布。实验结果显示, 硬X射线径向强度分布与低杂波的功率谱和托卡马克等离子体的放电参数有密切关系。

(1) 低杂波的  $\Delta \Phi$  较低时, 硬X射线径向强度分布较峰化, 而  $\Delta \Phi$  较高时, 硬X射线径向强度分布较平坦。

(2) 当等离子体密度由低变高, 硬X射线强度由峰化变得平坦。

(3) 磁场强度变大, 硬X射线径向强度分布变宽。

**致谢** 实验得到了 HT-7 托卡马克运行组的大力支持和低杂波运行组的通力合作, 在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Fisch N J. Phys Rev Lett, 1978, 41:873-876
- 2 Geeler S V, Steven J, Bernabei S, et al. Nucl Fusion, 1985, 25:1515-1528
- 3 Texter S, Knowlton S, Porkolab M, et al. Nucl Fusion, 1986, 26:1279-1291
- 4 Moreau D, Gormezano C, Tore Supra Team, et al. Plasma Phys Contr Fusion, 1991, 33:1621-1638
- 5 Naito O, JT-60Team. Plasma Phys Contr Fusion, 1993, 35:B215; B222

## A study on hard X-ray radiation during lower hybrid current drive on HT-7 superconducting tokamak

SHI Yuejiang LING Bili WAN Baonian DING Bojiang

(Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

### Abstract

A seven-channel NaI(Tl) detector array installed on HT-7 superconducting tokamak has been used to measure the hard X-ray ( $20 \text{ keV} < E_{\text{h}\nu} < 500 \text{ keV}$ ) emitted from plasma. The physical mechanism of LHW propagation and absorption in plasma was investigated by the measurement of hard X-ray radial distribution at different discharge parameters.

**Key words** Tokamak, Hard X-ray, LHCD, NaI(Tl) detector

**CLC** O536, O532