

# HT-7 低杂波电流驱动效率与 等离子体参数相关性实验

沈慰慈, 匡光力, 单家方, 丁伯江, 石跃江, 李建刚, 赵燕平

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:**通过开展低杂波电流驱动效率与等离子体参数相关性研究, HT-7 装置上的最大电流驱动效率达到  $\eta_{\text{CD}} = n_e R_p I_{\text{RH}} / P_{\text{LH}} \approx 1.4 \times 10^{19} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。实验结果表明, 优化低杂波的功率谱、等离子体密度、纵场等参数对提高驱动效率起到了关键作用。驱动效率对波谱、密度有较强的依赖性, 波谱在  $N_{\text{UH}}^{\text{peak}} = (2.45 \sim 2.9)$ , 密度为  $(1.5 \sim 2.0) \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时驱动效率较高; 驱动效率随着纵场的升高而增大; 同时, 改善托卡马克壁状态、降低杂质水平、提高放电稳定性, 对提高驱动效率有积极作用。

**关键词:** 低杂波电流驱动; 功率谱; 电流驱动效率

**中图分类号:** TL61+2.12

**文献标识码:** A

## 1 引言

传统的托卡马克等离子体电流是由变压器放电感应产生的, 受变压器有限伏秒数的限制, 感生的环向等离子体电流所能维持的时间受变压器最大磁通变化量的限制, 只能是有限的, 这就决定了托卡马克必然在脉冲运行模式下工作<sup>[1]</sup>。受控核聚变研究的最终目标是建立稳定的、连续运行的聚变堆, 因此实现托卡马克稳态运行的关键问题之一是如何提供连续的环向等离子体电流。低杂波(LH)是在磁约束等离子体中以低混杂模式传播的准静电波, 它是由微波波段的电磁波通过特定的天线耦合到等离子体中而激发的。低杂波驱动的快速电子通过朗道阻尼将其能量和动量传给平行于磁场方向的分速度与该方向波的相速度近似相等的电子, 使这些电子在沿着波动量方向的运动速度增加, 因此形成电流, 即低杂波驱动电流(LHCD)。低杂波具有较高的耦合效率和电流驱动效率, 利用低杂波驱动电流可以维持稳态的托卡马克环向等离子体电流, 从而有可能实现

超导托卡马克的长脉冲甚至稳态运行<sup>[2]</sup>。研究表明, 随着大功率微波系统的建立, 在 JT-60 装置上利用 5.7MW 的 LH 功率已成功驱动了 3.6MA 的等离子体电流, 最大电流驱动效率达到  $\eta_{\text{CD}} = 2.5 \times 10^{19} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 在 Tore Supra 上借助 LHCD 实现了高等离子体参数(1MA, 密度大于  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )下的准稳态运行, 放电维持时间超过 2min; 在 TRIAM-1M 装置上用 LHCD 获得长达 2h 的非感应托卡马克放电。目前, 低杂波电流驱动已成为托卡马克装置上最有希望的无感电流驱动方法<sup>[3-5]</sup>。

HT-7 装置是我国第一个超导托卡马克装置, 其主要目标是研究高温等离子体特性和托卡马克的稳态运行模式<sup>[6]</sup>。在世界上各大聚变装置普遍追求高品质放电的今天, 开展低杂波电流驱动与等离子体参数相关性的研究, 使其更加有利于托卡马克的高参数稳态运行, 对在 HT-7 上的物理实验具有特别重要的现实意义。

收稿日期: 2002-12-17; 修订日期: 2003-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19985005)

作者简介: 沈慰慈(1959-), 女, 副研究员, 1982年毕业于中国科学技术大学近代物理系, 主要从事等离子体物理、波加热与电流驱动物理实验研究。

## 2 系统

HT-7 超导托卡马克装置上的低杂波系统建成于 1996 年,工作频率为 2.45GHz,总输出功率为 1.2MW,主要目标是研究等离子体改善约束和实现托卡马克的高参数、稳态运行模式<sup>[7]</sup>。系统的微波源由 12 只俄罗斯 ISTOK 公司生产的 KU-2.45 型速调管及其驱动级器件组成,每只速调管额定输出功率为 100kW,可连续运行。速调管输出的微波由标准 BJ-22 矩形波导输送到天线;在每只速调管的输出端采用四端口环形器吸收反射波,保护速调管免受反射波的损坏。

在 HT-7 上先后使用二种结构的低杂波天线,其中一种为 2 × 12 多栅波导阵结构。天线辐射元(子波导端口)的波相位信息由安装在天线附近的监相器测量,经计算机处理后反馈控制速调管输入级中的数控相移器。波功率谱的范围在  $1 \leq N_{\parallel}^{\text{peak}} \leq 4$  之间,功率谱的主瓣半宽度  $\Delta n_{\parallel} = 0.8$ 。新天线采用多节波导阵结构,由 48[3(排) × 4(列)] 个子波导组成。12 只微波速调管放大器输出的功率分别馈送至对应的有固定相差的波导移相单元,各波导移相单元之间的相位差通过数控移相器来调节,波功率谱变化范围在  $1.91 \leq N_{\parallel}^{\text{peak}} \leq 3.19$  之间。新天线的相位控制更加稳定,功率传输能力也有所提高,更适合于电流驱动实验。

HT-7 装置上同时配备有三十多种诊断设备,可以提供包括等离子体密度、电子温度、离子温度、边界涨落和杂质辐射等在内的多项实验参数。

## 3 实验和讨论

图 1 是 HT-7 装置上典型的低杂波电流驱动放电波形,由上而下各道波形分别代表  $H_{\alpha}$  辐射信号、中心弦平均电子密度、低杂波功率、等离子体电流、中心杂质辐射和环电压。实验中对等离子体电流和位移信号采取了负反馈控制,低杂波在等离子体电流上升到平顶段后投入。从图 1 中可以看到,在低杂波功率投入后,环电压和  $H_{\alpha}$  信号很快下降,密度稍有上升,在整个加波期间杂质辐射维持在较低的水平。

实验中由于采用了负反馈控制,在整个放电过程中可维持等离子体电流和位移的不变,所以当低

杂波驱动等离子体电流时,必然会导致环电压的下降。我们估算由低杂波驱动的等离子体电流为  $I_p = \frac{\Delta V}{V_{OH}} I_p$ ,其中  $\Delta V = V_{OH} - V_{LH}$ ,  $V_{OH}$  为欧姆放电时的环电压值,  $V_{LH}$  是加低杂波后的环电压值,  $I_p$  是等离子体电流值,则低杂波电流驱动效率为:

$$\eta_{cd}^{exp} = \frac{n_e I_p R_p}{P_{\sigma}} \quad (1)$$

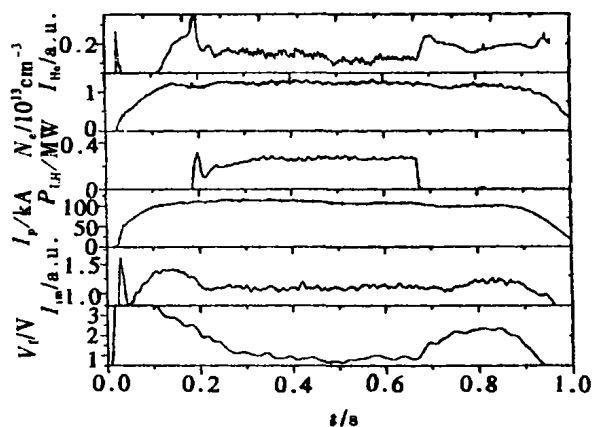


图 1 HT-7 典型低杂波电流驱动放电波形  
图中:  $I_m$  为杂质辐射,低杂波功率谱  $N_{\parallel}^{\text{peak}} = 2.9$ ,纵场  $B_T = 2T$ 。

式中,  $n_e$  是线平均电子密度;  $R_p$  是托卡马克的大半径;  $P_{\sigma}$  是通过朗道阻尼被等离子体吸收的低杂波功率。

如何有效地提高低杂波电流驱动效率一直是实验追求的主要目标之一。能够改善电流驱动效率的一个重要因素是优化低杂波的发射波谱。为此,我们在较广的波谱的范围内仔细地研究了电流驱动效率随波谱及其它等离子体参数的变化规律。

表 1 波谱与相位角的对应关系

$N_{\parallel}^{\text{peak}}$	2.05	2.45	2.9	3.25	4.0
$\Delta\varphi/^{\circ}$	90	110	130	150	180

HT-7 上低杂波多栅波导阵天线提供了一个在  $1 < N_{\parallel}^{\text{peak}} < 4$  范围内可以灵活变换的功率谱,其波谱性实验与相位角的对应关系列于表 1 中。实验中分别选择等离子体密度  $n_e = 1.5, 2.0, 2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

三个典型值,在其它参数不变的条件下,研究了驱动效率与波谱的对应关系。图 2 是在加低杂波期间有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  的测量结果。可以看到,在一定的实验条件下,当等离子体密度大于  $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时, HT-7 上的杂质水平基本维持一致。我们选择相同的杂质背景条件,从  $90^\circ \sim 180^\circ$  扫描低杂波的相位角。图 3 是驱动效率随低杂波功率谱及等离子体密度的变化关系。实验结果显示,环电压的下降值与波的相位角及等离子体密度均有很强对应关系。随着波的功率谱的逐渐增大,驱动效率先是上升,在达到最大值后,又很快下降,与密度之间也存在同样的对应关系。相应的等离子体放电参数为:等离子体电流  $I_p = 170 \text{ kA}$ ,纵场  $B_T = 2 \text{ T}$ ,低杂波功率  $P_{\text{RF}} = 250 \text{ kW}$ ,脉冲宽度  $t = 500 \text{ ms}$ 。图 3 清楚地显示,在 HT-7 装置上最佳的低杂波电流驱动效率是在  $N_{\parallel}^{\text{peak}} = 2.9$ ,  $n_e = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时取得的。

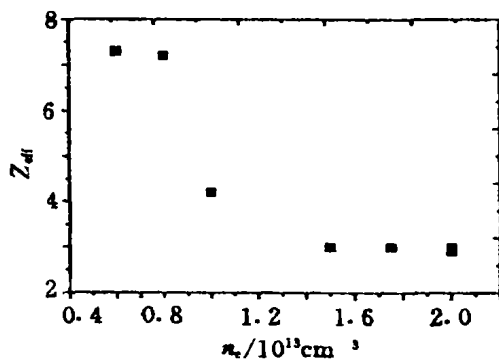


图 2 加低杂波期间有效电荷数随等离子体密度的变化关系  
 $N_{\parallel}^{\text{peak}} = 2.9; B_T = 1.9 \text{ T}; P_{\text{RF}} = 250 \text{ kW}$ 。

低杂波电流驱动效率与波谱及其它等离子体参数间存在以下关系<sup>[8]</sup>:

$$\eta_{\text{CD}}^{\text{the}} = \frac{310}{\ln \Lambda} \frac{4}{5 + Z_{\text{eff}}} \frac{1}{\langle N_{\parallel}^2 \rangle} \quad (2)$$

其中,

$$\frac{1}{\langle N_{\parallel}^2 \rangle} = \frac{\int_{N_{\parallel}^{\text{nc}}}^{+\infty} \frac{P(N_{\parallel})}{N_{\parallel}^2} dN_{\parallel} - \int_{-\infty}^{-N_{\parallel}^{\text{nc}}} \frac{P(N_{\parallel})}{N_{\parallel}^2} dN_{\parallel}}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(N_{\parallel}) dN_{\parallel}} \quad (3)$$

式中,  $P(N_{\parallel})$  为低杂波的功率谱;  $N_{\parallel}$  为平行折射率;  $N_{\parallel}^{\text{nc}}$  为平等折射率的临界值,表示波的可近性条

件;  $\Lambda$  为与等离子体能量有关的参数。  $N_{\parallel}^{\text{nc}}$  可表示如下:

$$N_{\parallel}^{\text{nc}} = \frac{\omega_{pe}}{\omega} + \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega_{ce}}\right)^2 + \left(\frac{\omega_{pe}}{\omega}\right)^2} \quad (4)$$

式中,  $\omega$  是微波频率;  $\omega_{pe}$  是等离子体电子频率;  $\omega_{pi}$  是等离子体离子频率;  $\omega_{ce}$  是等离子体电子回旋频率。由式(2) ~ (4) 可以推断,低杂波的电流驱动效率受到波的可近性条件  $N_{\parallel}^{\text{nc}}$  和有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  两个因素的影响;同时由于它与等离子体频率密切相关,也就决定了它是一个和密度与纵场都有关系的量。

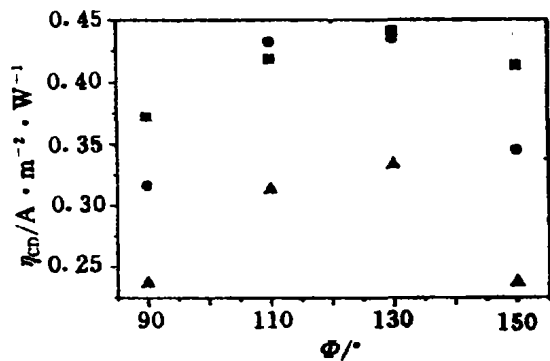


图 3 低杂波电流驱动效率随功率谱及等离子体密度的变化关系  
 ■ —  $n_e = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ; ● —  $n_e = 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ;  
 ▲ —  $n_e = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。

波的平行折射率决定了波是否能在等离子体中传播,只有满足可近性条件的波才能被等离子体吸收。也就是说,驱动效果与天线子波导间的相位差密切相关,相位角太小,则波不易进入等离子体芯部;若相位角太大,由于波的相速度较小,则大部分波的能量在外围就被电了吸收。所以,选择合适的相位角对低杂波电流驱动实验来说至关重要。在 HT-7 低杂波电流驱动实验中,在多个密度条件下,当相位角在  $130^\circ$  左右时,驱动效果最好,驱动效率最高。除了功率谱对驱动效率的影响之外,在低杂波电流驱动实验中,人们还利用多种方法来提高在高参数等离子体条件下的电流驱动效率。由式(2)可知,提高低杂波的工作频率或纵场可以提高可近性条件中的密度极限;也可以通过改善托卡马克的壁状态以降低有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  及改进放电稳定性等来实现这一目标。

由于低杂波系统的工作频率受速调管参数的限制,无法改变频率,简单的方法是通过改变纵场来观察其对驱动效率的影响。HT-7 托卡马克放电时,纵场可在 1.6~2.2T 范围内变化。图 4 是低杂波电流驱动效率随纵场的变化关系。可以看出,随着纵场的增加,驱动效率也随之增加。这是因为在 Fisch 理论中,随着纵场的增加,  $N_{\parallel}^{\text{res}}$  减小,导致更多的波能量传播到等离子体中心,通过朗道阻尼与等离子体相互作用产生快电子,驱动出更多的等离子体电流。图 5 的硬 X 射线产生的韧致辐射测量信号也表明,在强纵场条件下,由低杂波驱动产生的快电子的分布更加峰化,这表明高能电子靠近中心区域,有利于电流驱动,因此驱动效率高;而当纵场较弱时,由低杂波电流驱动产生的快电子的分布则靠近外围,驱动效率相对较低。这与 Fisch 理论的解释一致。

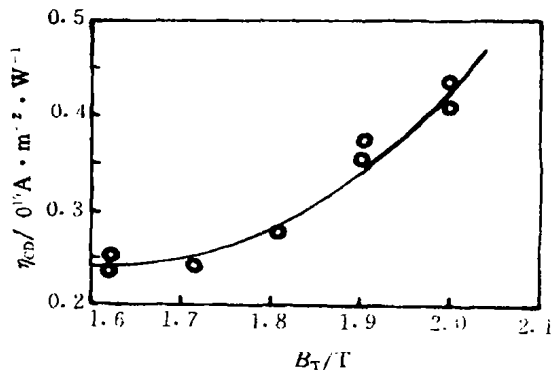


图 4 低杂波电流驱动效率随纵场的变化  
 $N_{\parallel}^{\text{res}} = 2.45; n_e = 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}; P_{\text{rf}} = 250 \text{ kW}$ 。

在式(2)中有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  和驱动效率成反比关系,因此降低  $Z_{\text{eff}}$  同样可以提高电流驱动效率。自 1998 年起,在 HT-7 装置上利用离子回旋技术成功地对装置真空室内壁进行了硼化处理,使得托卡马克的壁状态有了较大的改观,从而使有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  大大降低。这几年来,随着硼化技术的不断改进,加上托卡马克更换了石墨限制器,降低了纵场的波纹度,使低杂波电流驱动效率和可获得有效电流驱动的等离子体密度范围均得以提高,成功地实现了高密度、大电流条件下的低杂波电流驱动。在等离子体密度为  $(1.5 \sim 2.5) \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  的范围内均获得较好的驱动效果;在密度为  $n_e = 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  条件下,仍有较高的驱动效率  $\eta_{\text{cd}} = 0.75 \times 10^{10} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;

在密度为  $n_e = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  时,电流驱动效率最高,达到  $\eta_{\text{cd}} = 1.4 \times 10^{10} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

图 6 是硼化前后不同等离子体密度条件下低杂波电流驱动效率值。实验结果表明,托卡马克内壁的硼化对提高低杂波电流驱动效率有积极的作用。壁状态的改进,使得托卡马克的杂质控制在—较低的水平,同时也获得了较高的电流驱动效率。

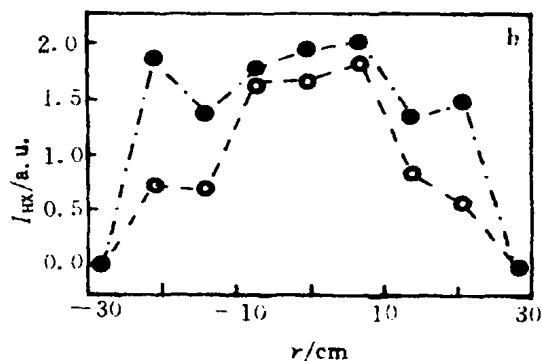


图 5 不同纵场条件下低杂波期间的快电子产生的韧致辐射分布  
● —  $B_z = 1.62\text{T}$ ; ○ —  $B_z = 2.0\text{T}$ 。

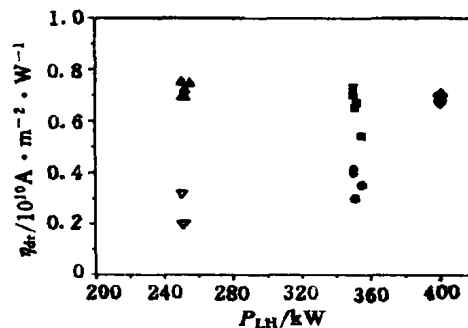


图 6 硼化前后低杂波电流驱动效率与波功率及等离子体密度的对应关系

■ —  $n_e = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ; ● —  $n_e = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ;  
▲ —  $n_e = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ; ◆ —  $n_e = 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ; ▽ —  $n_e = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。  
空心符号为硼化前结果;实心符号为硼化后结果。

#### 4 小结

综上所述,在 HT-7 低杂波电流驱动实验中,波谱、等离子体密度、纵场、壁状态等对驱动效率均有不同程度的影响。通过合理地选择波与等离子体参数,在提高电流驱动效率、实现高参数、长脉冲运行方面取得了可喜的成绩。主要实验结果如下:

a. 驱动效果与天线子波导之间的相位差密切相关,如相位角太小,波不容易进入等离子体芯部,相应的电流驱动效率也小;若相位角太大,由于波的相速度较小,则大部分波的能量在外围就被电子吸收,同样没有高的驱动效率。实验观察到,当相位角在  $130^\circ$  左右时,驱动效果较好。

b. 在一定的等离子体密度范围内,电流驱动效果较好。这是由波的可近性条件和杂质浓度决定的。密度低,容易满足可近性条件,而此时杂质浓度高;反之,密度高,杂质浓度低,部分波束不满足可近性条件。二者的共同作用导致了存在一个密度区间,使得低杂波驱动效果较好。对 HT-7 而言,在  $B_T = 1.9\text{T}$ ,  $P_{\text{LI}} = 250\text{kW}$ ,  $N_{\parallel}^{\text{peak}} = 2.9$  的条件下,当线平均密度为  $1.5 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$  时,驱动效率最大;驱动效率随着纵向磁场强度的升高而增大,同样是受可近性条件的影响。

c. 硼化是一种降低杂质、改善托卡马克壁状态有效方法,对低杂波电流驱动效率亦有明显的改善功效。

d. 在优化参数的条件下,最大电流驱动效率达到  $\eta_{\text{CD}} \approx 1.4 \times 10^{19}\text{A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

本实验得到 HT-7 实验运行组全体同事的大力支持,同时诊断组的同志们也提供了大量实验数据,在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] John Wesson. Tokamak [M]. Oxford: Clarendon Press, 1997.
- [2] Fisch N J. Confining a Tokamak Plasma with RF-Driven Currents [J]. Phys. Rev. Lett., 1978, 41, 873.
- [3] Kondoh T, the JT-60U Team. High Performance and Current Drive Experiments in the JAERI Tokamak-60 Upgrade [J]. Phys. Plasmas, 1994, 1(5): 1498.
- [4] Equipe Tore Supra, Present by X Litaudon. Stationary Regimes of Improved Confinement in Tore Supra [J]. Plasma Phys. Control. Fusion, 1996, 38, A251.
- [5] Hanada K. Enhanced Current Drive Efficiency in a Long Discharge on TRIAM-1M [J]. Nucl. Fusion, 2001, 4(11): 1539.
- [6] Xie J K, HT-7 Group. HT-7 Superconducting Tokamak and Its Operation [C]. IAEA-CN-64/A P1-13, 1996.
- [7] Kuang Guangli, Shan Jiafang, Xu Weihua. A Lower Hybrid Current Drive System on the Superconducting Tokamak HT-7 [J]. Fusion Technology, 1999, 36(2): 212.
- [8] Leuterer F, Soldner F X, McCormick K. Efficiency of Lower Hybrid Current Drive at 2.45GHz in ASDEX [J]. Nucl. Fusion, 1991, 31(12): 2315.

## EXPERIMENT OF THE CORRELATION BETWEEN THE LHCD EFFICIENCY AND PLASMA PARAMETERS ON THE HT-7 TOKAMAK

SHEN Wei-ci, KUANG Guang-li, SHAN Jia-fang, DING Bo-jiang,  
SHI Yue-jiang, LI Jian-gang, ZHAO Yan-ping

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

**Abstract:** Research of the relationship between the efficiency of lower hybrid current drive and plasma parameters has been carried out on the HT-7 superconducting tokamak. The highest current drive efficiency is  $\eta_{\text{CD}} = n_e R_p I_{\text{RF}} / P_{\text{LI}} \approx 1.4 \times 10^{19}\text{A} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . The experimental results show that the optimization of power spectrum, plasma density, toroidal magnetic field and impurity concentration are beneficial to the raise of the current drive efficiency. The current drive efficiency with these parameters has been studied. The dependence of  $\eta_{\text{CD}}$  on the spectrum and plasma density is very clear. A high  $\eta_{\text{CD}}$  can achieved when  $N_{\parallel}^{\text{peak}} = (2.45 \sim 2.9)$ , and density are  $(1.5 \sim 2.0) \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ . It also has been seen that current drive efficiency increases with the increase of toroidal magnetic field. At the same time, good wall condition, lower impurity and stable discharge are beneficial to the current drive efficiency.

**Key words:** LHCD; Power spectrum; Current drive efficiency