

捕获电子对低杂波与电子回旋波的协同效应的影响

杨友磊 胡业民 项农

Effects of trapping electrons on synergy of lower-hybrid wave and electron cyclotron wave

Yang You-Lei Hu Ye-Min Xiang Nong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 245202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.245202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.245202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率微波作用下O-离子解吸附产生种子电子过程

Seed electron production from O detachment in high power microwave air breakdown

物理学报.2016, 65(5): 055202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.055202>

电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中传输特性研究

Study on transmission characteristics of electromagnetic waves in inhomogeneously magnetized plasma sheath

物理学报.2016, 65(3): 035201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.035201>

电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究

Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma

物理学报.2015, 64(5): 055201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.055201>

微波阶梯阻抗变换器低气压电晕放电粒子模拟

Particle-in-cell simulation of corona discharge in low pressure in stepped impedance transformer

物理学报.2013, 62(2): 025201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.025201>

太赫兹波在非磁化等离子体中的传输特性研究

Studies of terahertz wave propagation in non-magnetized plasma

物理学报.2012, 61(24): 245202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.245202>

捕获电子对低杂波与电子回旋波的协同效应的影响*

杨友磊¹⁾²⁾ 胡业民^{1)3)†} 项农¹⁾³⁾

1) (中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (中国科学院磁约束聚变理论中心, 合肥 230031)

(2017年5月3日收到; 2017年8月18日收到修改稿)

电子回旋波和低杂波的协同效应可有效地提高两只波的电流驱动效率. 本文数值研究了捕获电子效应对电子回旋波和低杂波协同的影响. 结果显示, 随着捕获角的增大, 双波协同驱动电流会减小, 且协同因子也会明显减小, 即捕获角对两只波协同驱动流的影响要比其对单独驱动电流的影响更加敏感. 通过加宽低杂波共振区可减弱电子回旋波电流驱动对捕获角的依赖, 同时发现随着电子回旋波功率的增加, 捕获角对电子回旋波电流驱动的影响也会变小.

关键词: 捕获电子, 协同效应, 低杂波, 电子回旋波

PACS: 52.40.Db, 52.55.Fa, 52.55.Wq, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.66.245202

1 引言

稳态运行对基于托卡马克 (Tokamak) 的聚变反应堆至关重要, 稳态运行要求等离子体电流完全由非感应电流驱动来维持. 另外, 在先进托卡马克运行模式中, 电流剖面的控制也是一个重要的研究课题. 除自举电流外, 中性束注入和射频波电流驱动是主要的非感应电流驱动方法^[1]. 低杂波 (lower-hybrid wave, LHW) 电流驱动是射频波电流驱动中效率最高的^[2-4], 在现有托卡马克中被广泛使用^[5-8], 并且计划用于未来的国际热核聚变实验堆 (ITER)^[9] 和中国聚变工程实验堆 (CFETR)^[10]. 而电子回旋波 (electron cyclotron wave, ECW) 电流驱动^[11] 也广泛地用于等离子体电流剖面及磁流体不稳定性的控制等^[12,13].

在托卡马克环形几何位形中, 带电粒子按照其导心的漂移运动, 可划分为通行粒子和捕获粒子.

通行粒子的平行速度在运动过程中不变号, 因此可以携带电流; 而捕获粒子的平行速度在一个回弹周期内会变号两次, 在环向上只有相对通行粒子来说很小的进动, 因此可以认为基本不携带电流. 对于给定的磁面上通行和捕获电子的份额可以用低场侧捕获角的大小来度量, 捕获角即速度空间正负通行/捕获临界边界的夹角. 捕获角和磁面上的最大磁场和最小磁场有关, 靠近磁轴的磁面上捕获角小, 称为浅捕获; 靠近边界的磁面上捕获角大, 称为深捕获.

LHW 通过朗道阻尼, 在平行于磁场的某一选定方向上加速电子, 使得电子的速度空间分布函数产生非对称的平台, 进而产生平行电流. LHW 的耦合和传播对等离子体参数很敏感, 使得其功率沉积和电流驱动剖面不易控制. ECW 通过回旋共振在垂直方向上加速电子, 使得特定方向的温度升高, 碰撞率下降, 从而产生非对称电阻而驱动出电流 (Fisch-Boozer 电流^[14]), 或使特定方向通行电子

* 国家自然科学基金 (批准号: 11475220, 11375234) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yeminhu@ipp.ac.cn

变成捕获电子从而产生相反方向净电子流进而形成电流 (Ohkawa 电流^[15]). ECW 可以以一个窄波束的形式在等离子体中传播, 其功率沉积和电流驱动都很局域且容易控制, 因此非常适用于控制等离子体电流剖面. 但是 ECW 的电流驱动效率通常远低于 LHW 电流驱动的效率.

由于 LHW 电流驱动和 ECW 电流驱动的这些互补的特征, 实际应用中经常把它们结合起来同时用于托卡马克实验来维持和控制等离子体电流^[16-18]. 理论和数值研究以及实验研究都有发现 LHW 电流驱动和 ECW 电流驱动之间有协同效应^[19-25]. 协同效应指在相同的等离子体条件下, 二者同时注入时驱动电流不同于二者单独注入时驱动电流之和. 在满足一定的匹配条件时, 协同效应可以显著地增加驱动电流. 协同效应源于 LHW 和 ECW 产生的速度空间扩散的相互影响. ECW 在垂直方向上加速电子, 这些被加速的电子通过碰撞散射可能会进入 LHW 的共振区, 相当于给 LHW 提供了更多的共振电子. 另一方面, 被 LHW 加速的电子也可能通过碰撞散射到 ECW 的共振区, 从而影响 ECW 电流驱动.

ECW 电流驱动受捕获的影响很大, Fisch-Boozer 和 Ohkawa 这两种电流驱动机理产生的驱动电流方向相反. 在捕获较小时, Fisch-Boozer 效应占主导, 而随着捕获的增大, Ohkawa 效应的贡献会越来越大. 研究表明捕获效应也会使得 LHW 驱动的载流电子变成捕获电子而不再携带电流, 从而降低 LHW 电流驱动效率^[26]. 总之, 捕获对 ECW 电流驱动和 LHW 电流驱动都有很大的影响, 因此也很有可能对 ECW 和 LHW 的协同产生影响.

但是目前对 ECW 和 LHW 协同效应的研究中还未曾详细讨论捕获的影响. 本文通过 CQL3D^[27] 程序数值求解回弹平均的准线性方程, 研究了在不同 LHW 共振区和不同 ECW 功率下捕获电子对协同效应的影响, 有助于进一步理解 ECW 和 LHW 的协同效应物理, 并有助于优化实验参数, 以期驱动更多的电流和更好地控制电流剖面.

2 动理学模型

在 ECW 和 LHW 驱动以及碰撞的作用下, 电子速度分布函数的演化可以用准线性方程来描述^[27]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = C(f) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \cdot \left(\mathbf{D}_{\text{EC}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \cdot \left(\mathbf{D}_{\text{LH}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}} \right), \quad (1)$$

式中 f 是电子的分布函数; $C(f) \equiv C(f, f_m) + C(f, f_i)$ 是线性化的碰撞算子; $\mathbf{u} = \mathbf{p}/m = \gamma \mathbf{v}$ 是电子单位静止质量的动量, m 为电子的静止质量, $\gamma = \sqrt{1 + u^2/c^2}$ 是相对论因子, 其中 c 为真空中的光速; \mathbf{D}_{EC} 和 \mathbf{D}_{LH} 分别是 ECW 和 LHW 的准线性扩散系数. \mathbf{D}_{EC} 和 \mathbf{D}_{LH} 可由相对论性的 Kennel 和 Engelmann 表达式得到^[28]:

$$\mathbf{D} = D_{//} \hat{u}_{//} \hat{u}_{//} + D_{\perp //} \hat{u}_{\perp} \hat{u}_{//} + D_{// \perp} \hat{u}_{//} \hat{u}_{\perp} + D_{\perp} \hat{u}_{\perp} \hat{u}_{\perp}, \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} D_{//} &= \sum_n \frac{q^2}{2m^2} \pi \gamma \delta(\gamma \omega - k_{//} u_{//} - n \omega_c^{\pm}) \\ &\quad \times \left| \vartheta_{n, \mathbf{k}}^{\pm} \right|^2 \left(\frac{k_{//} u_{\perp}}{\omega \gamma} \right)^2, \\ D_{// \perp} &= D_{\perp //} = \sum_n \frac{q^2}{2m^2} \pi \gamma \delta(\gamma \omega - k_{//} u_{//} - n \omega_c^{\pm}) \\ &\quad \times \left| \vartheta_{n, \mathbf{k}}^{\pm} \right|^2 \left(\frac{k_{//} u_{\perp}}{\omega \gamma} \right) \left(\frac{n \omega_c^{\pm}}{\omega \gamma} \right), \\ D_{\perp} &= \sum_n \frac{q^2}{2m^2} \pi \gamma \delta(\gamma \omega - k_{//} u_{//} - n \omega_c^{\pm}) \\ &\quad \times \left| \vartheta_{n, \mathbf{k}}^{\pm} \right|^2 \left(\frac{n \omega_c^{\pm}}{\omega \gamma} \right)^2, \end{aligned} \quad (3)$$

并有

$$\begin{aligned} \vartheta_{n, \mathbf{k}}^{\pm} &= J_{n+1} \frac{E_x - i E_y}{2} + J_{n-1} \frac{E_x + i E_y}{2} \\ &\quad + \frac{u_{//}}{u_{\perp}} J_n E_{//}, \end{aligned} \quad (4)$$

这里 q 为粒子携带的电量; $k_{//}$ 和 k_{\perp} 分别是波矢 \mathbf{k} 在平行和垂直于磁场方向的分量; ω_c^{\pm} 是局域的回旋频率, ω 是入射射频波的频率; 贝塞尔函数 J 的宗量是 $k_{\perp} u_{\perp} / \omega_c^{\pm}$; $\hat{u}_{//}$ 和 \hat{u}_{\perp} 分别是 $u_{//}$ 和 u_{\perp} 方向的单位矢量, $u_{//}$ 和 u_{\perp} 是单位静止质量的动量在平行和垂直方向的分量; n 是射频波的谐波数, 对于 LHW, $n = 0$; 对于 EAST 上的 ECW, $n = 2$; E_x , E_y 和 $E_{//}$ 是电场的各个分量.

本文讨论速度空间中捕获角对两支波协同效应的影响, 对应于环位形中的一个磁面. ECW 和 LHW 能产生协同效应的前提是两支波的功率可以沉积在同一个磁面上. ECW 和 LHW 的传播可以用射线追踪方法来计算. 在射线追踪模型中, 射频波用一组独立传播的射线来模拟, 每根射线携带的

功率 $\Delta P = P(n_{//}) \Delta n_{//}$, 其中 $P(n_{//})$ 是射频波的功率谱, 通常由天线程序计算得到. 射频波会被满足共振条件的电子吸收, 共振条件即 (3) 式中的 δ 函数表示的多普勒频移后的相对论性共振条件

$$\gamma\omega - k_{//}u_{//} = n\omega_c, \quad (5)$$

其中 $k_{//}$ 是在 $\Delta k_{//} = \Delta n_{//}c/\omega$ 范围内的平行方向波数. 共振条件决定了在速度空间中准线性扩散系数非零的区域, 而准线性扩散系数的值则由 (2)—(4) 式来计算. ECW 和 LHW 的共振区的示意图见图 1.

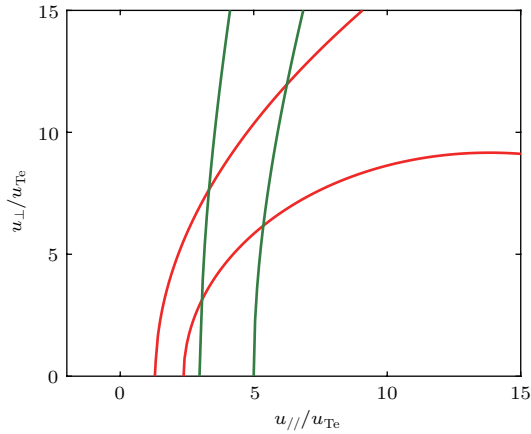


图1 (网刊彩色) ECW(红)和LHW(绿)的共振区示意图
Fig. 1. (color online) Schematic illustration of the resonance regions for the ECW (red) and the LHW (green).

本文中所用的等离子体平衡参数基于 EAST 托卡马克. 通过调整 ECW 的入射角, 可以使其功率沉积在归一化环向磁通的平方根 $\rho = 0.4$ 的磁面上, 在这一磁面上, 捕获角可达约 52° . 通过 CQL3D 程序设置, 调节回弹平均过程中磁面上磁场最大值和最小值之差, 可将捕获角在约 8° — 52° 之间进行调节, 等效于 ECW 沉积在不同的径向位置, 但波的入射功率和在速度空间的共振区位置等保持不变. 磁轴处的环向磁场约为 2.4 T, 等离子体温度约 2 keV. LHW 的共振区按惯例取为 3—5 倍热速度, 并在研究 LHW 的共振区宽度的影响时调节为 3—7 倍热速度.

3 数值计算结果

3.1 固定共振区、不同捕获角的结果

本节首先研究了固定 ECW 和 LHW 的共振区及功率不变时, 不同捕获角对双波协同效应的影

响. 双波共同驱动时, 协同效应会对 ECW 和 LHW 的驱动电流产生不同程度的影响, 而捕获对 ECW 和 LHW 的影响也有很大区别, 因此有必要将协同时二者贡献的驱动电流区分开来. LHW 的驱动电流正比于平行分布函数在 LHW 共振区内的平台高度, 可以通过这个关系, 根据协同时 LHW 共振区内平行分布函数的平台高度, 以及单支 LHW 驱动时的平台高度和驱动电流, 计算出协同时等效的低杂驱动电流:

$$J_{LH}^s = \frac{F_P^s}{F_P} J_{LH}, \quad (6)$$

其中 J_{LH}^s 和 F_P^s 分别是双波协同时等效的 LHW 驱动电流和平台高度, J_{LH} 和 F_P 分别是单支 LHW 驱动的电流和平台高度. 将双波协同时的驱动电流记为 J_{EC+LH}^s , 则协同时等效的 ECW 驱电流

$$J_{EC}^s = J_{EC+LH}^s - J_{LH}^s. \quad (7)$$

图 2 展示了单支 ECW 的驱动电流 J_{EC} 、协同时等效的 ECW 驱动电流 J_{EC}^s 、单支 LHW 的驱动电流 J_{LH} 、协同时等效的 LHW 驱动电流 J_{LH}^s 以及协同时的总驱动电流 J_{EC+LH}^s 随捕获角的变化. 从图 2 可以看出: 双波协同时两支波的驱动电流都比单独驱动时大, 即 $J_{EC}^s > J_{EC}$, $J_{LH}^s > J_{LH}$; ECW 的驱动电流受捕获角的影响很大, 捕获角从 8° 变化到 52° 的过程中, J_{EC} 和 J_{EC}^s 都下降了 80% 以上; 而 LHW 受捕获角的影响也较大, 捕获角从 8° 变化到 52° 的过程中, J_{LH} 减小了约 23%, J_{LH}^s 减小了

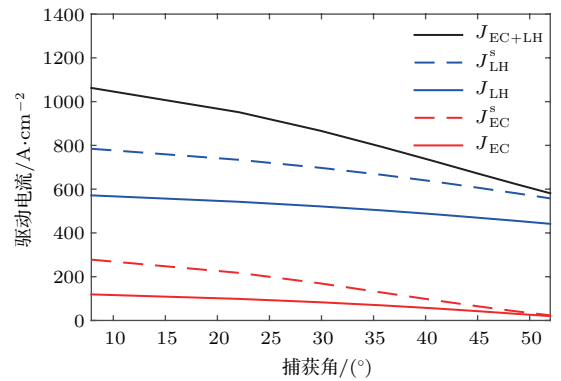


图2 (网刊彩色) 单支 ECW(红实线)、协同时 ECW(红虚线)、单支 LHW(蓝实线)、协同时 LHW(蓝虚线) 以及 ECW 和 LHW 协同时 (黑实线) 驱动的电密度随捕获角的变化

Fig. 2. (color online) Current densities with different trap angles for the EC only case (red solid line), the contribution of EC wave in EC+LH case (red dashed line), the LH wave only case (blue solid line), the contribution of LH wave in EC+LH case (blue dashed line), and the EC+LH case (black solid line).

约29%; 总电流受捕获角的影响在二者之间, 捕获角从 8° 变化到 52° 的过程中, J^s 减少了约45%.

图2中的结果可以通过分布函数的非麦克斯韦部分和速度空间流的流线来理解. 分布函数的非麦克斯韦部分可以用来表示分布函数在射频波驱动和碰撞下的变化, 其定义为 $f_{nM} \equiv f - f_M$, 其中 f 是稳态分布函数, f_M 是初始的麦克斯韦分布, 二者都对其最大值进行了归一化. 速度空间的流定义为 $\mathbf{S} = -\mathbf{D} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}}$, 其中 \mathbf{D} 包含碰撞和射频波

的贡献, \mathbf{S} 的流线可以用来理解电子在速度空间的流动情况, 进而有助于理解ECW和LHW的相互影响. 图3给出了图2中最小捕获和最大捕获时分布函数的非麦克斯韦部分及速度空间的流线, 其中 $u_{Te} = \gamma v_{Te}$, v_{Te} 是电子的热速度. 图3(a1), (a2)和(a3)分别对应单支ECW、单支LHW和双波协同在小捕获时的结果; 图3(b1), (b2)和(b3)分别对应单支ECW、单支LHW和双波协同在大捕获时的结果.

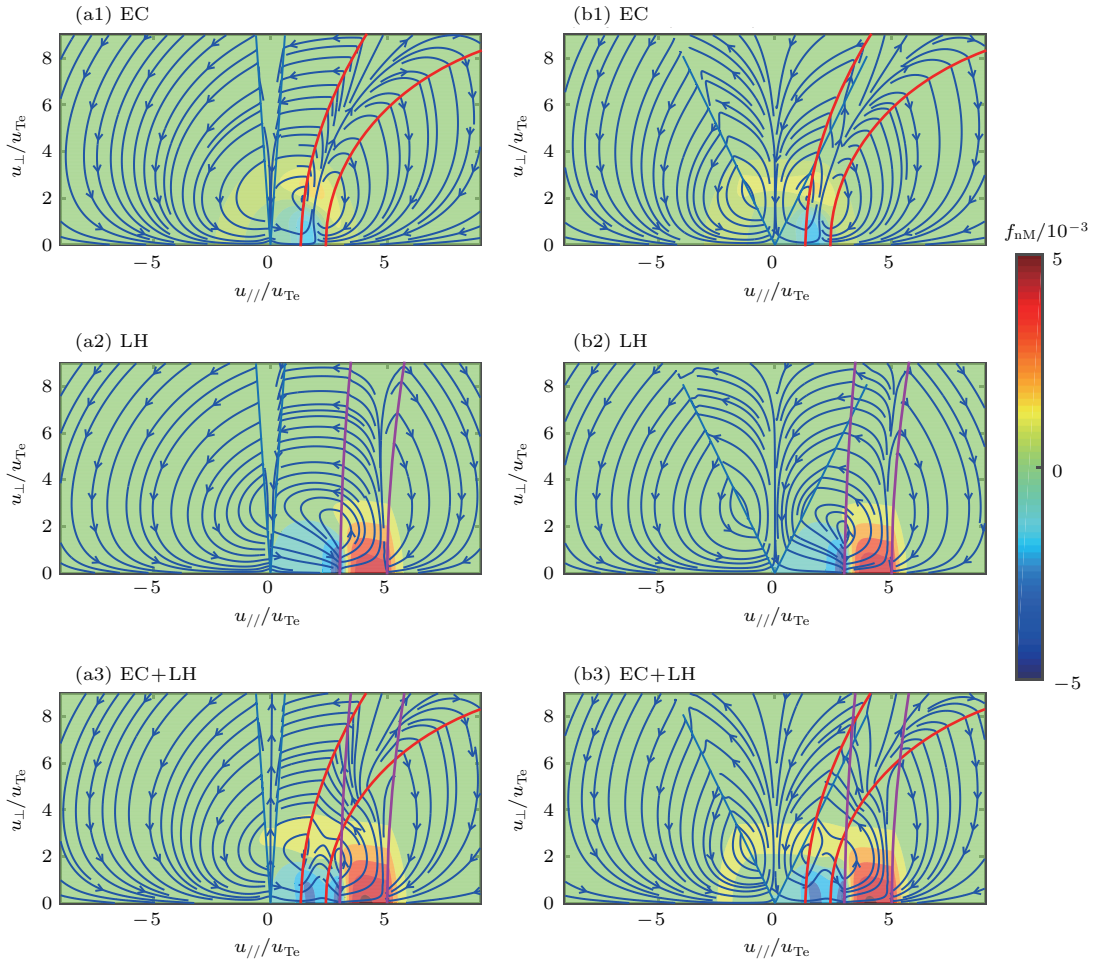


图3 (网刊彩色) 分布函数的非麦克斯韦部分和速度空间的流线 (a1) 浅捕获时单支ECW; (a2) 浅捕获时单支LHW; (a3) 浅捕获时ECW和LHW协同; (b1) 深捕获时单支ECW; (b2) 深捕获时单支LHW; (b3) 深捕获时ECW和LHW协同

Fig. 3. (color online) Filled contours of the non-Maxwellian parts of the distribution functions and the streamlines of the flux for (a1) the EC wave only case with barely trapping, (a2) the LH wave only case with barely trapping, (a3) the EC+LH case with barely trapping, (b1) the EC wave case with deep trapping, (b2) the LH only case with deep trapping, and (b3) the EC+LH case with deep trapping.

对比图3(a1)和(a3)可以看出: 有LHW存在时, ECW可以驱动出更多载流电子, ECW的电流驱动被增强, 即 $J_{EC}^s > J_{EC}$; 从流线可以看出, LHW共振区内被加速的电子有一部分散射回了EC共振区内; 另外, ECW和LHW的共振区有部

分重叠, 在这一区域的电子会受到两支波的共同驱动, 对两支波的驱动电流都有增强作用, 增加LHW共振区宽度或者提高ECW功率可以使重叠区域的电子更多, 可能会产生更强的协同效应. 对比图3(a2)和图3(a3)可以看出: 由于ECW的存在,

LHW的共振电子也增加了, LHW电流驱动也得到了加强, 即 $J_{LH}^s > J_{LH}$; 从流线可以看出, 这主要是由于被ECW在垂直方向上加速的电子, 通过碰撞散射到LHW的共振区, 使得LHW可以与更多电子共振, 从而驱动出更多的电流; 两支波共振区的重叠部分中, ECW对LHW电流驱动也有一定的增强. 对比图3(a1)和图3(b1)可以看出: 捕获会导致ECW驱动出的部分载流电子变成捕获电子而不能携带电流, 从而使得ECW的驱动电流减小; 而ECW的共振区通常距离通行/捕获边界较近, 因此捕获对ECW电流驱动的影响非常大. 对比图3(a2)和图3(b2)可以看出: 当捕获角增大时, 部分LHW驱动的载流电子也会落入捕获区, 从而导致LHW的驱动电流减小; 由于LHW的共振区距离通行/捕获边界相对远一些, 这个影响比对ECW电流驱动的影响小. 同样, 对比图3(a3)和图3(b3)可以看出: 捕获角的增大会导致很多双波协同的载流电子变为捕获电子, 从而导致驱动电流减小; 这个影响的大小介于对ECW和对LHW的影响之间; 捕获角的增大既直接减少了LHW驱动电流, 又影响了协同时ECW对LHW的促进作用, 所以捕获角变大时 J_{LH}^s 比 J_{LH} 下降得更多.

双波协同时, 两支波的驱动电流都会受到影响, 这些影响可以用协同因子来量化. 协同因子的定义为

$$\eta_{EC+LH} = \frac{J_{EC+LH}^s}{J_{EC} + J_{LH}}, \quad \eta_{EC} = \frac{J_{EC}^s}{J_{EC}}, \quad \eta_{LH} = \frac{J_{LH}^s}{J_{LH}}. \quad (8)$$

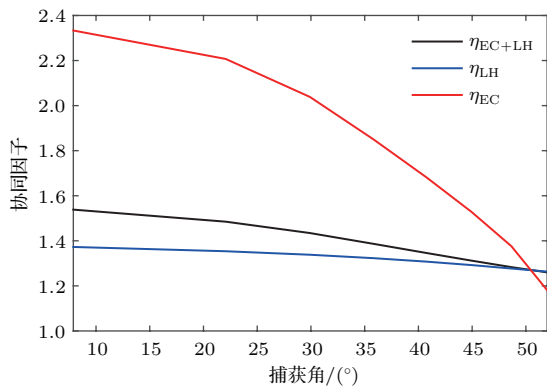


图4 (网刊彩色) ECW(红)、LHW(蓝)、以及EC+LH协同(黑)的协同因子随捕获角的变化

Fig. 4. (color online) Synergy factors with different trap angles for the EC wave (red), the LH wave (blue), and the EC+LH synergy (black).

图2中的电流对应的协同因子如图4所示. 从图4可以看出: 随着捕获角的增大, 协同因子下降; 捕获角对ECW的协同因子影响很大; 捕获角对LHW的协同因子影响较小; 捕获角对总的协同因子的影响介于二者之间, 并且由于 $J_{EC}^s \ll J_{LH}^s$, 而更接近对LHW的影响.

从上面的分析可以看出, LHW共振区的宽度影响两支波共振区重叠区域的面积, 因而加宽LHW共振区可能会产生更强的协同效应. 另外, 提高ECW的功率, ECW可以把电子加速到速度更高的区域, 更接近甚至直接进入LHW的共振区, 也可能产生更强的协同效应. 下面分别讨论这两种情况.

3.2 LHW共振区加宽时的结果

为研究LHW共振区宽度对双波协同的影响, 本节将3.1节中LHW的共振区宽度取为3—7倍热速度, 其他设置保持不变, 研究了捕获角对驱动电流和协同因子的影响.

此时的电流随着捕获角的变化如图5所示. 与图2进行对比可以看出: LHW共振区加宽后, J_{LH} 和 J_{LH}^s 相应地增加了近一倍, 但是变化趋势基本没有改变; J_{EC}^s 的变化趋势也基本没有改变; 但是 J_{EC}^s 的变化趋势改变比较明显, J_{EC}^s 的下降速度明显降低. LHW的共振区加宽后, 对ECW电流驱动的影响也相应增强, 相对地, ECW受捕获的影响减弱.

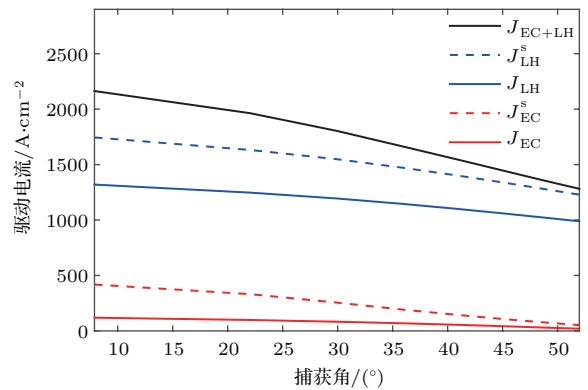


图5 (网刊彩色) 单支ECW(红实线)、协同时ECW(红虚线)、单支LHW(蓝实线)、协同时LHW(蓝虚线)以及ECW和LHW协同时(黑实线)驱动电流随捕获角的变化

Fig. 5. (color online) Current densities with different trap angles for the EC only case (red solid line), the contribution of EC wave in EC+LH case (red dashed line), the LH wave only case (blue solid line), the contribution of LH wave in EC+LH case (blue dashed line), and the EC+LH case (black solid line).

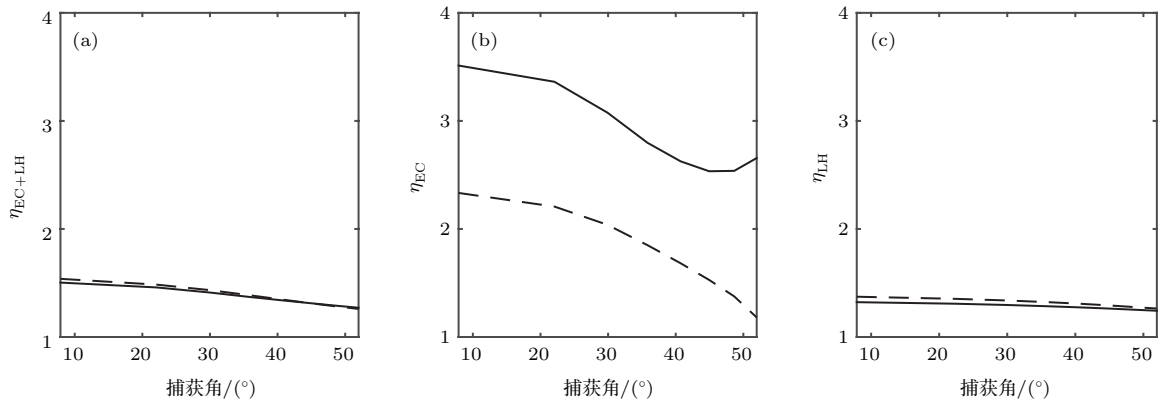


图6 (a) 总的协同因子、(b) ECW的协同因子以及(c) LHW的协同因子在LHW共振区为3—5(虚线)和3—7(实线)时随捕获角的变化

Fig. 6. Synergy factors with different trap angles for (a) the EC+LH synergy, (b) the EC wave and (c) the LH wave, with lower-hybrid resonance regions of 3-5 (dashed lines) and 3-7 (solid lines).

这时协同因子随捕获角的变化如图6所示, 其中虚线同图4中的结果, 实线是LHW共振区加宽后的结果. 通过对比可以看出: LHW共振区加宽后, η_{EC} 增大了很多, 而且对捕获角的依赖减弱, 甚至在捕获较大时随着捕获的继续增大而增大; 由于LHW电流驱动的比例增大了, ECW对LHW的影响相对变弱, 因此 η_{LH} 变小; η_{EC+LH} 主要受 η_{LH} 影响, 因此也略有减小.

3.3 ECW功率加倍时的结果

为研究ECW功率对双波协同的影响, 本节将3.1节中ECW的功率加倍, 其他设置不变, 研究了捕获角对驱动电流和协同因子的影响.

此时的电流随着捕获角的变化如图7所示. 与图2进行对比可以看出: ECW功率加大后, J_{EC} 和 J_{EC}^s 有了大幅的增加, 在捕获比较小时, ECW的驱动电流甚至与LHW的驱动电流可比; J_{EC} 和 J_{EC}^s 受捕获的影响依然很大, 随着捕获的增大而迅速下降; 由于 J_{EC}^s 占总电流的比例增大, 而 J_{EC}^s 又随着捕获的增大而迅速下降, 导致 J^s 的下降速度也加大; 随着ECW的功率增大, 其对LHW电流驱动的影响也加大, 因此 J_{LH}^s 有较大幅度的提高.

图7中最小捕获和最大捕获时对应的分布函数的非麦克斯韦部分及速度空间的流线如图8所示. 图8(a1), (a2)和(a3)分别对应单支ECW、单支LHW和双波协同在小捕获时的结果; 图8(b1), (b2)和(b3)分别对应单支ECW、单支LHW和双波协同在大捕获时的结果. 对比图8和图3可以看出, ECW功率加大后, 可以驱动更多的电子, 并可以把电子加速到更大的垂直速度.

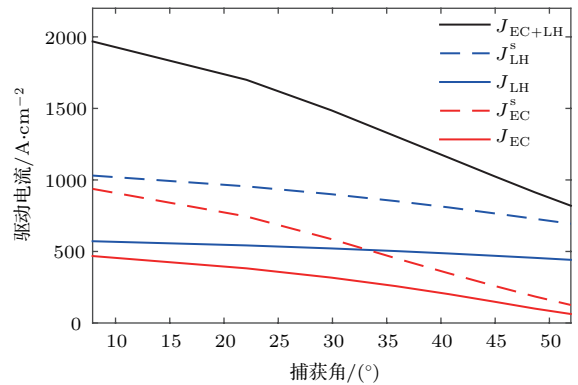


图7 (网刊彩色) 单支ECW(红实线)、协同时ECW(红虚线)、单支LHW(蓝实线)、协同时LHW(蓝虚线)以及ECW和LHW协同时(黑实线)驱动的电密度随捕获角的变化

Fig. 7. (color online) Current densities with different trap angles for the EC only case (red solid line), the contribution of EC wave in EC+LH case (red dashed line), the LH wave only case (blue solid line), the contribution of LH wave in EC+LH case (blue dashed line), and the EC+LH case (black solid line).

这时协同因子随着捕获角的变化如图9所示, 其中虚线同图4中的结果, 实线是ECW功率加倍后的结果. 通过对比可以看出: ECW功率加大后, LHW对ECW的影响相对减弱, 因此 η_{EC} 在浅捕获时略微减小, 但是ECW功率加大后, 可以把电子加速到更大的垂直速度, 随着捕获角的继续增大, 更多的捕获电子落到LHW的共振区内, LHW将部分捕获电子在平行方向上加速变成通行电子, η_{EC} 反而上升了; ECW功率加大后, 对LHW电流驱动的影响也加大, η_{LH} 增大了很多; η_{EC+LH} 总体随着捕获角的增加而下降, 但是下降速度受到 η_{EC} 影响而先快后慢.

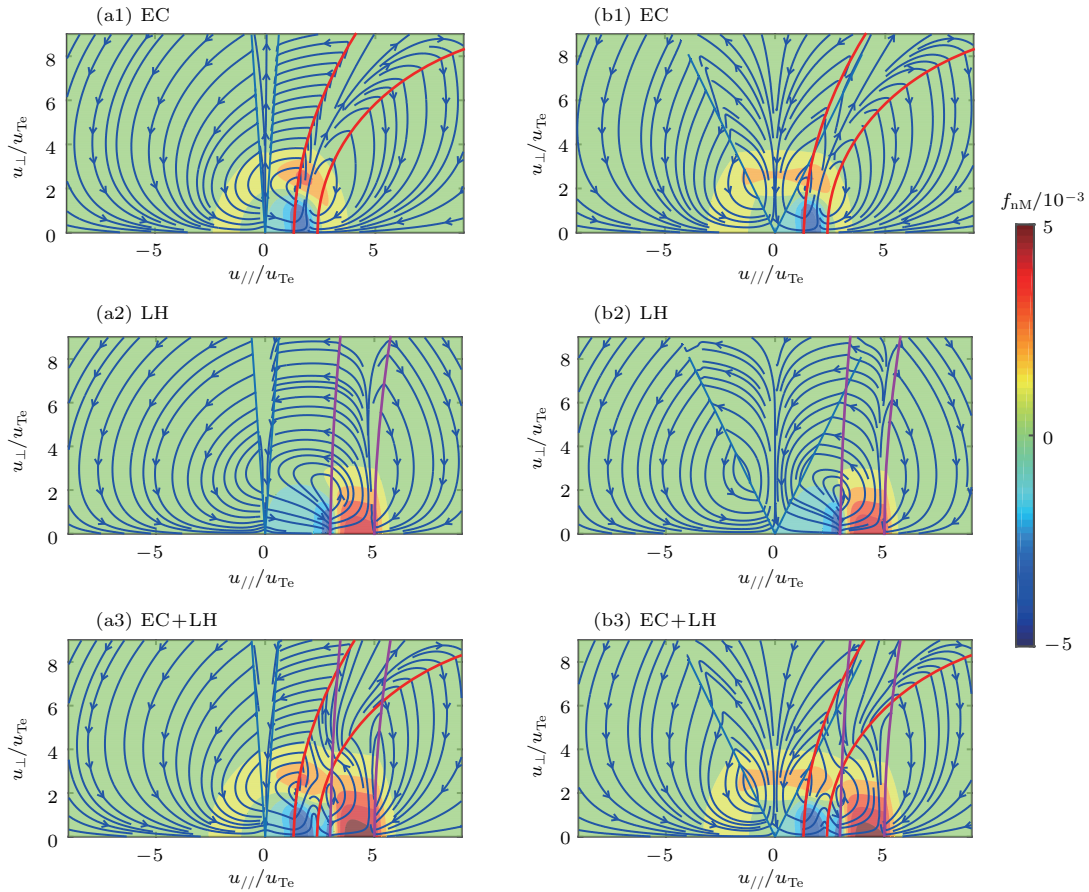


图8 (网刊彩色) 分布函数的非麦克斯韦部分和速度空间的流线 (a1) 浅捕获时单支ECW; (a2) 浅捕获时单支LHW; (a3) 浅捕获时ECW和LHW协同; (b1) 深捕获时单支ECW; (b2) 深捕获时单支LHW; (b3) 深捕获时ECW和LHW协同

Fig. 8. (color online) Filled contours of the non-Maxwellian parts of the distribution functions and the streamlines of the flux for (a1) the EC wave only case with barely trapping, (a2) the LH wave only case with barely trapping, (a3) the EC+LH case with barely trapping, (b1) the EC wave case with deep trapping, (b2) the LH only case with deep trapping, and (b3) the EC+LH case with deep trapping.

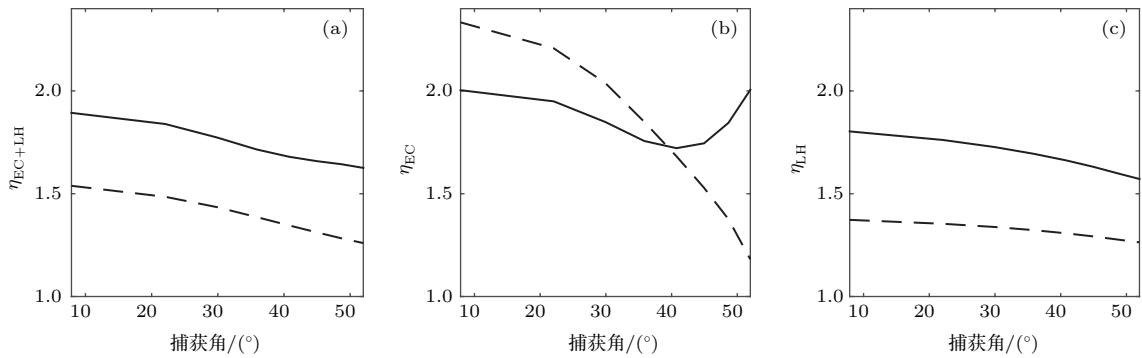


图9 (a) 总的协同因子、(b) ECW的协同因子以及(c) LHW的协同因子在ECW功率为5 MW (虚线)和10 MW (实线)时,随捕获角的变化

Fig. 9. Synergy factors with different trap angles for (a) the EC+LH synergy, (b) the EC wave and (c) the LH wave, with the electron cyclotron wave power of 5 MW (dashed line) and 10 MW (solid line).

4 讨论与结论

本文通过求解准线性方程,研究了捕获电子效应对ECW和LHW协同效应的影响.协同电流由

ECW和LHW共同驱动,本文利用LHW驱动电流与其共振区内平台高度成正比这一规律,区分出了协同时两支波对驱动电流的贡献,进而分别研究了不同捕获角下协同对两支波各自的影响.在捕获角

由约 8° 增大到约 52° 的过程中, ECW的驱动电流下降了80%以上, LHW驱动电流下降了约20%以上, 总驱动电流下降了约45%, 在ECW功率较大时总驱动电流的下降甚至超过了50%. ECW的驱动电流随着捕获角的增大而下降得很快, 通过加宽LHW共振区有利于减弱ECW电流驱动对捕获的依赖. ECW的功率加大后, 可以把电子加速到更大的垂直速度, 随着捕获角的增大, 更多捕获电子可以被LHW加速变成通行电子, 从而产生更有效的协同效应, 并减小捕获角对ECW电流驱动的影响.

ECW电流驱动常用于驱动局域的等离子体电流, 在需要离轴驱动时, 捕获对ECW电流驱动非常不利. 本文的研究表明, 在捕获角较大时, LHW可以将部分捕获电子在平行方向上加速变成通行电子, 从而驱动出更多的局域等离子体电流. 而且在捕获角比较大时, 加大LHW的共振区宽度和加大ECW的功率都可以获得更好的协同效应.

另外, 在ITER^[1,9]和CFETR^[10]的高温、高密度参数下, LHW很难传播到等离子体芯部, 而且效率降低. 本文的研究工作表明, 在捕获角较大的情况下, ECW和LHW的协同效应依然可以显著地增强电流驱动, 因此有望改善LHW电流驱动.

本文的研究仅限ECW和LHW在速度空间的相互影响. 在实际实验中, ECW和LHW的传播和功率沉积、射频波引起的等离子体温度的变化、快电子的约束、靴带电流等因素都需要综合考虑.

参考文献

- [1] Gormezano C, Sips A C C, Luce T C, Ide S, Becoulet A, Litaudon X, Isayama A, Hobirk J, Wade M R, Oikawa T, Prater R, Zvonkov A, Lloyd B, Suzuki T, Barbato E, Bonoli P, Phillips C K, Vdovin V, Joffrin E, Casper T, Ferron J, Mazon D, Moreau D, Bundy R, Kessel C, Fukuyama A, Hayashi N, Imbeaux F, Murakami M, Polevoi A R, St John H E 2007 *Nucl. Fusion* **47** S285
- [2] Fisch N J 1978 *Phys. Rev. Lett.* **41** 873
- [3] Bonoli P T, Englade R C 1986 *Phys. Fluids* **29** 2937
- [4] Peysson Y, Decker J, Nilsson E, Artaud J F, Ekedahl A, Goniche M, Hillairet J, Ding B, Li M, Bonoli P T, Shiraiwa S, Madi M 2016 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **58** 044008
- [5] Cesario R, Amicucci L, Castaldo C, Kempenaars M, Jachmich S, Mailloux J, Tudisco O, Galli A, Krivska A, Contributors J E 2011 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **53** 085011
- [6] Ding B J, Li M H, Liu F K, Shan J F, Li Y C, Wang M, Liu L, Zhao L M, Yang Y, Wu Z G, Feng J Q, Hu H C, Jia H, Cheng M, Zang Q, Lyu B, Duan Y M, Lin S Y, Wu J H, Hillairet J, Ekedahl A, Peysson Y, Goniche M, Tuccillo A A, Cesario R, Amicucci L, Shen B, Gong X Z, Xu G S, Zhao H L, Hu L Q, Li J G, Wan B N, EAST Team 2017 *Nucl. Fusion* **57** 022022
- [7] Goniche M, Sharma P K, Basiuk V, Baranov Y, Castaldo C, Cesario R, Decker J, Delpech L, Ekedahl A, Hillairet J, Kirov K, Mazon D, Oosako T, Peysson Y, Prou M 2011 *AIP Conf. Proc.* **1406** 407
- [8] Li J G, Luo J R, Wan B N, Liu Y X, Gong X Z, Li D C, Jie Y X, Li Z X, Xu X D 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2414 (in Chinese) [李建刚, 罗家融, 万宝年, 刘岳修, 龚先祖, 李多传, 揭银先, 李智秀, 徐东 2000 物理学报 **49** 2414]
- [9] Decker J, Peysson Y, Hillairet J, Artaud J F, Basiuk V, Becoulet A, Ekedahl A, Goniche M, Hoang G T, Imbeaux F, Ram A K, Schneider M 2011 *Nucl. Fusion* **51** 073025
- [10] Song Y T, Wu S T, Li J G, Wan B N, Wan Y X, Fu P, Ye M Y, Zheng J X, Lu K, Gao X G, Liu S M, Liu X F, Lei M Z, Peng X B, Chen Y 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 503
- [11] Prater R 2004 *Phys. Plasmas* **11** 2349
- [12] Günter S, Gantenbein G, Gude A, Igochine V, Maraschek M, Mück A, Saarelma S, Sauter O, Sips A C C, Zohm H 2003 *Nucl. Fusion* **43** 161
- [13] Henderson M A, Alberti S, Angioni C, Arnoux G, Behn R, Blanchard P, Bosshard P, Camenen Y, Coda S, Condréa I, Goodman T P, Hofmann F, Hogge J P, Karpushov A, Manini A, Martynov A, Moret J M, Nikkola P, Nelson-Melby E, Pochelon A, Porte L, Sauter O, Ahmed S M, Andrebe Y, Appert K, Chavan R, Degeling A, Duval B P, Etienne P, Fasel D, Fasoli A, Favez J Y, Furno I, Horacek J, Isoz P, Joye B, Klimanov I, Lavanchy P, Lister J B, Llobet X, Magnin J C, Marletaz B, Marmillod P, Martin Y, Mayor J M, Mylnar J, Paris P J, Perez A, Peysson Y, Pitts R A, Raju D, Reimerdes H, Scarabosio A, Scavino E, Seo S H, Siravo U, Sushkov A, Tonetti G, Tran M Q, Weisen H, Wischmeier M, Zabolotsky A, Yhuang G 2003 *Phys. Plasmas* **10** 1796
- [14] Fisch N J, Boozer A H 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 720
- [15] Alikeev V V, Parail V V 1991 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **33** 1639
- [16] Ridolfini V P, Barbato E, Bruschi A, Dumont R, Gandini F, Giruzzi G, Gormezano C, Granucci G, Panaccione L, Peysson Y, Podda S, Saveliev A N 2001 *AIP Conf. Proc.* **595** 225
- [17] Chen S Y, Tang C J, Zhang X J 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 065202
- [18] Giruzzi G, Artaud J F, Dumont R J, Imbeaux F, Bibet P, Berger-By G, Bouquey F, Clary J, Darbos C, Ekedahl A, Hoang G T, Lennholm M, Maget P, Magne R, Segui J L, Bruschi A, Granucci G 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 255002
- [19] Fidone I, Giruzzi G, Granata G, Meyer R L 1984 *Phys. Fluids* **27** 2468

- [20] Maehara T, Yoshimura S, Minami T, Hanada K, Nakamura M, Maekawa T, Terumichi Y 1998 *Nucl. Fusion* **38** 39
- [21] Chen S Y, Hong B B, Liu Y, Lu W, Huang J, Tang C J, Ding X T, Zhang X J, Hu Y J 2012 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **54** 115002
- [22] Huang J, Bai X Y, Zeng H, Tang C J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 025202 (in Chinese) [黄捷, 白兴宇, 曾浩, 唐昌建 2013 物理学报 **62** 025202]
- [23] Hong B B, Chen S Y, Tang C J, Zhang X J, Hu Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 115207 (in Chinese) [洪斌斌, 陈少永, 唐昌建, 张新军, 胡有俊 2012 物理学报 **61** 115207]
- [24] Dumont R J, Giruzzi G 2005 *Radio Frequency Power in Plasmas* **787** 257
- [25] Dumont R J, Giruzzi G 2004 *Phys. Plasmas* **11** 3449
- [26] Jiao Y M, Long Y X, Dong J Q, Shi B R, Gao Q D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 180 (in Chinese) [焦一鸣, 龙永兴, 董家齐, 石秉仁, 高庆弟 2005 物理学报 **54** 180]
- [27] Harvey R W, Mccoy M G 1992 *IAEA Technical Committee Meeting on Advances in Simulation and Modeling of Thermonuclear Plasmas* (Montreal: IAEA Institute of Physics Publishing) pp489–526
- [28] Kennel C F, Engelmann F 1966 *Phys. Fluids* **9** 2377

Effects of trapping electrons on synergy of lower-hybrid wave and electron cyclotron wave*

Yang You-Lei¹⁾²⁾ Hu Ye-Min^{1)3)†} Xiang Nong¹⁾³⁾

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

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Center for Magnetic Fusion Theory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

(Received 3 May 2017; revised manuscript received 18 August 2017)

Abstract

Steady state operation is essential for Tokamak-based fusion reactor, in which the plasma current has to be fully sustained and controlled by non-inductive methods. Lower-hybrid current drive is the most effective radio-frequency current drive method, which, however, has the drawback that the driven current profile is difficult to control. Electron cyclotron current drive has the ability to deposit power and drive current in a highly localized and robustly controllable way, while the efficiency of electron cyclotron current drive is known to be significantly lower than that of lower-hybrid current drive. Due to those complementary features, the combinative usage of lower-hybrid wave and electron cyclotron wave has been proposed. The current driven by simultaneously using the waves might be significantly larger than the sum of the currents driven by the waves individually in the same plasma conditions, which is the so-called synergy effect. While the lower-hybrid current drive and the electron cyclotron current drive are both affected by the trapping effect, which implies that the synergy effect between lower-hybrid current drive and the electron cyclotron current drive may also closely related to the trapping effect. In this paper, the effects of trapping on the synergy of lower-hybrid current drive and the electron cyclotron current drive are investigated by solving the bounce-averaged quasi-linear equation with different trapping angles. The diffusions induced by the lower-hybrid wave and the electron cyclotron wave are considered simultaneously. The resulting steady-state electron distribution function as a balance between the collisions and the wave-induced diffusions is obtained numerically by the CQL3D code, which is then integrated to calculate the driven plasma current. The velocity-space fluxes are analyzed for understanding the mechanism and the physics of the synergy process. It is found that the currents driven by the waves decrease as trapping angle increases. The synergy factors also decrease as trapping angle increases, which means that the current drive processes in the synergy case are more sensitive to the trapping effect than in the single wave case. The current driven by electron cyclotron wave drops rapidly with the increase of trapping angle, while the existence of lower-hybrid wave is helpful in decelerating the dropping. The lower-hybrid wave reduces the dependency of the electron cyclotron current drive on the trapping effect. The decouple effect turns stronger as the resonance region of the lower-hybrid wave becomes wider. Increasing the power of the electron cyclotron wave leads to more accelerated electrons and more electrons with relatively high parallel velocities, which results in stronger synergy effect and less dependence on trapping.

Keywords: trapping electrons, synergy effects, lower-hybrid waves, electron cyclotron waves

PACS: 52.40.Db, 52.55.Fa, 52.55.Wq, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.66.245202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11475220, 11375234).

† Corresponding author. E-mail: yeminhu@ipp.ac.cn