

04

Механизм подавления режима нижнегибридной генерации тока плазмы на токамаке ФТ-2

© В.Н. Будников, В.В. Дьяченко, П.Р. Гончаров,
В.Б. Ермолаев, Л.А. Есипов, Е.Р. Итс, М.Ю. Кантор,
Д.В. Куприенко, С.И. Лашкул, К.А. Подушникова,
И.Е. Сахаров, Е.О. Чечик, С.В. Шаталин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 27 сентября 1999 г.

Исследуется механизм отключения режима нижнегибридной (НГ) генерации тока на токамаке ФТ-2. Показано, что НГ ток отключается при развитии параметрической неустойчивости на периферии плазмы, вызывающей распад НГ волн на замедленные волны, взаимодействующие с ионами плазмы. Причина развития параметрической неустойчивости связывается с уменьшением порогов ее возбуждения при снижении электронной температуры в разряде.

Хорошо известно, что режим нижнегибридной (НГ) генерации тока в токамаках прекращается при плотностях плазмы, значительно меньших, чем плотность НГ резонанса. Согласно [1,2], это связано с параметрическим распадом НГ волн на замедленные волны, которые взаимодействуют с ионами плазмы эффективнее, чем с электронами. В работе представлены полученные на токамаке ФТ-2 результаты, которые говорят в пользу этой гипотезы.

Основные параметры токамака ФТ-2 и режима омического разряда: $R = 55$ см, $a = 8$ см, $B_T = 2.2$ Т, $I_p = 20$ кА, $T_{eOH} = 400$ эВ, $T_{iOH} = 90$ эВ, $Z_{eff} = 3$. ВЧ волна (100 кВт, 920 МГц) вводилась в плазму с помощью двухволноводного грилла с продольным замедлением $N_{||} \sim 2.5$. Плотность линейной трансформации для этой НГ волны составляла $3.5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Плотность в центре разряда была $2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Она была выбрана так, чтобы режим генерации тока, возникающий при включении ВЧ мощности, отключался до конца ВЧ импульса.

Во время ВЧ импульса наблюдаются два различных режима разряда. В начале ВЧ импульса возникал режим НГ генерации тока. Он ясно индицируется падением напряжения на обходе плазмы (рис. 1, *a*). При обратном скачке напряжения на обходе наблюдался существенный нагрев ионов и рост плотности плазмы, что указывало на режим ионного НГ нагрева.

На стадии генерации тока плотность плазмы и ионная температура меняются слабо (рис. 1, *b, c*), в то время как электронная температура (рис. 1, *d*) значительно падает. Падение электронной температуры тока связано с уменьшением омической мощности во время ВЧ импульса P_E , определяемой из следующего баланса:

$$P_E = I_P U_{loop} - \frac{d(LI_P^2/2)}{dt}. \quad (1)$$

Здесь $L = 4\pi R(\ln \frac{b}{a} + \frac{l_i}{2})$ — индуктивность плазменного шнура, b — радиус петли, измеряющей напряжение на обходе плазмы. Изменение внутренней составляющей индуктивности шнура l_i (рис. 1, *e*) было измерено с помощью пологоидальных магнитных зондов, определяющих величину $\beta_j + l_i/2$. Эволюция величины β_j (рис. 1, *f*) была вычислена по измеренным профилям электронной и ионной температуры и плотности плазмы, показанных на рис. 2.

Резкие изменения P_E (рис. 1, *g*) при включении и выключении ВЧ импульса говорят о значительном перераспределении тока в эти моменты времени. Доля ВЧ тока в плазме, оцененная из этих скачков, составляет 70% при включении ВЧ импульса и 45% в режиме ионного нагрева. Малая доля омического тока на этой стадии разряда является одной из основных причин сохранения низкой электронной температуры до конца ВЧ импульса. Другая причина может быть связана с увеличенными потерями тепла за счет сильной турбулентности, развивающейся после перехода плазмы в режим нагрева ионов [3].

Вводимая гриллом НГ волна с замедлением $N_{||} \sim 2-3$ не имеет в плазме НГ резонанса и взаимодействует только с убегающими электронами с энергией 25–50 keV, генерируя тороидальный ток плазмы. В режиме ионного нагрева появляются новые каналы поглощения ВЧ мощности — взаимодействие НГ волн с ионами и электронами меньшей энергии. Свидетельством этому служат следующие экспериментальные факты.

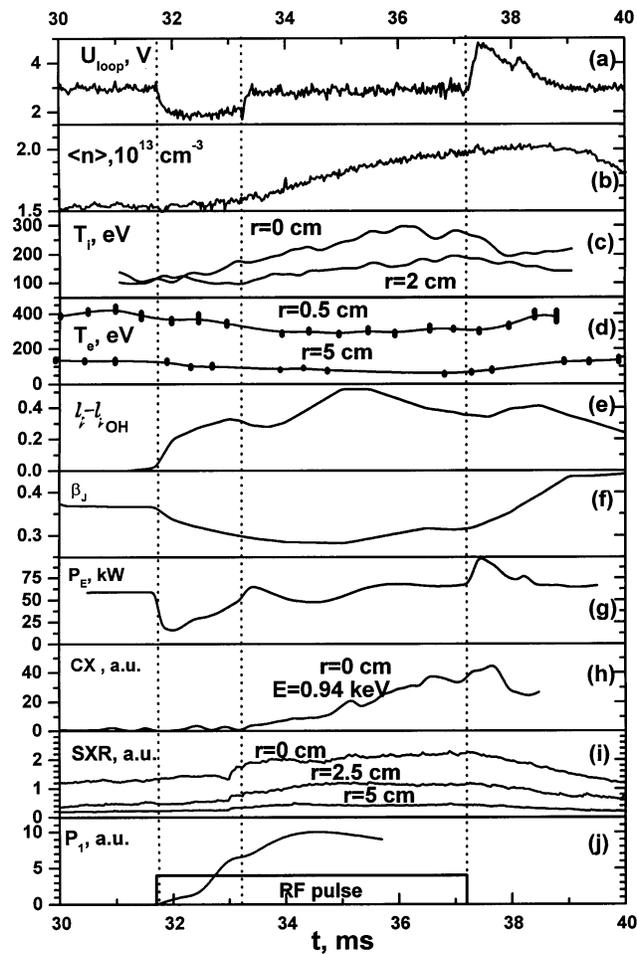


Рис. 1. Временная эволюция параметров плазмы во время ВЧ импульса: *a* — напряжение на обходе, *b* — электронная плотность, *c* — ионная температура, *d* — электронная температура, *e* — изменение внутренней индуктивности шнура, *f* — величина β_j , *g* — омическая мощность, *h* — поток атомов перезарядки с энергией 0.94 keV, *i* — потоки мягкого рентгеновского излучения, *j* — интенсивность первого сателлита.

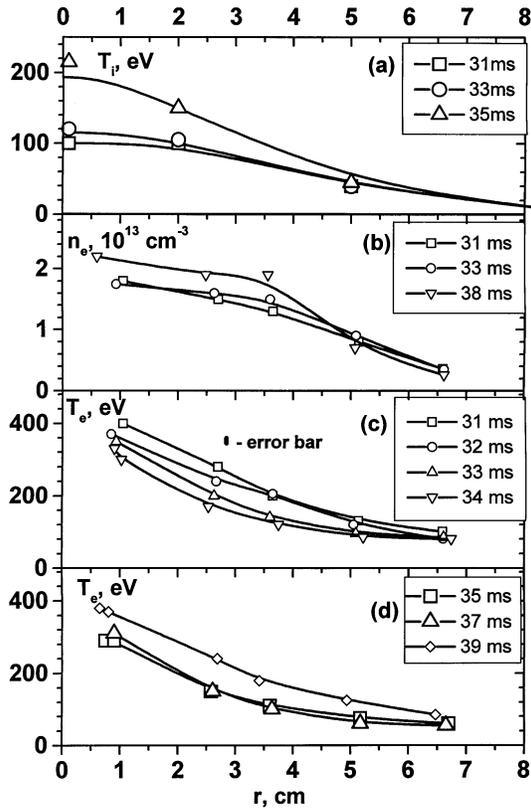


Рис. 2. Эволюция профилей плотности плазмы (a), ионной температуры (b) и электронной температуры (c, d) во время ВЧ импульса.

Основной из них — сильный нагрев ионов в центре плазмы (рис. 1, d). Рост потока атомов перезарядки с энергией 1 keV (рис. 1, h) указывает на появление в этой области НГ волн с поперечным замедлением $N_{\perp} = c/v_i \sim 600$. Волны с таким сильным замедлением ($N_{\perp} \sim c/3v_{Ti}$) должны полностью поглощаться ионами [4]. Анализ ионного энергодобавления показывает, что после отключения генерации тока в центре плазмы ионами поглощается до 6 kW ВЧ мощности.

Дисперсионное соотношение для НГ волн дает оценку для продольного замедления взаимодействующих с ионами волн $N_{\parallel} \sim 10$. Такие волны взаимодействуют с электронами с энергией $> 2 \text{ keV}$ по механизму Ландау, что приводит к росту концентрации электронов в этом диапазоне энергии. Этот рост подтверждается скачком уровня мягкого рентгеновского излучения в центре разряда (рис. 1, *i*), возникающим непосредственно до отключения режима генерации тока. Измерение спектра рентгеновского сигнала методом фольг показывает, что рост концентрации электронов происходит в области 2–10 keV.

Замедленные волны в плазме могут возникать в результате параметрического распада вводимой НГ волны [1]. В наших экспериментах для наблюдения распада использовался 5-электродный Лэнгмюровский зонд [5], установленный в тени диафрагмы и работающий в режиме ВЧ антенны. При включении ВЧ мощности в спектре ВЧ флуктуаций возникали два пика, один из которых совпадал с частотой накачки 920 MHz, а другой был сдвинут в низкочастотную область на 30 MHz [6]. Интенсивность центрального пика не менялась во время ВЧ импульса, в то время как интенсивность спутника вырастала примерно на порядок (рис. 1, *j*). Отсутствие голубого спутника в спектре флуктуаций указывает на параметрический распад ВЧ волны. Частотный сдвиг красного спутника соответствует ионной циклотронной частоте на радиусе 7 cm от центра разряда со стороны слабого магнитного поля. Мы полагаем, что в этой области происходит параметрический распад вводимой НГ волны f_0 на дочерние волны с частотой $f_0 - f_{ci}$ и более сильным замедлением, которые слабее взаимодействуют с убегающими электронами, несущими плазменный ток при ВЧ импульсе. Как видно из рис. 1, *j*, развитие параметрической неустойчивости предшествует всем описанным выше явлениям. Появление распада согласуется с уменьшением порогов параметрической неустойчивости $P_{thr} \sim T_e/n_e$ [7] при снижении электронной температуры на стадии НГ генерации тока.

Таким образом отключение НГ генерации тока на токамаке ФТ-2 может быть связано с уменьшением электронной температуры. Ее падение приводит к снижению порога возбуждения параметрических неустойчивостей и распаду НГ волн. Образующиеся при распаде замедленные дочерние волны начинают взаимодействовать с ионами при более низкой плотности по сравнению с волнами, излучаемыми антенной. Такой же механизм может работать и при развитии параметрической неустойчивости в центре плазмы, наблюдавшейся на ФТ-2 с помощью

усиленного рассеяния [8]. В конечном итоге параметрический распад НГ волн приводит к переходу от электронного к ионному поглощению ВЧ мощности и отключению режима генерации тока.

Работа поддержана грантами РФФИ 97–2–18084 и РФФИ 98–2–18346, а также грантом ИНТАС 95–1351.

Список литературы

- [1] Будников В.Н., Есинов Л.А., Ирзак М.И. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 13. С. 15–19.
- [2] Budnikov V.N., Irzak M.A. // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 1996. V. 38 (12A). P. 135–147.
- [3] Будников В.Н., Буланин В.В., Гурченко А.Д. и др. // Физика плазмы. 1998. Т. 24. В. 3. С. 262–265.
- [4] Karney C. // Phys. Fluids. 1979. V. 22. P. 2188–2209.
- [5] Есинов Л.А., Сахаров И.Е., Чечик Е.О. и др. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 4. С. 48–54.
- [6] Kantor M.Yu., Borevich A.A., Budnikov V.N. et al. // Proceed. of 26th EPS. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Maastricht, 1999. P. 1789–1792.
- [7] Porkolab M. // Phys. Fluids. 1977. V. 20. P. 2058–2075.
- [8] Будников В.Н., Есинов Л.А., Ирзак М.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. В. 9. С. 480–483.