

ПОНИЖЕНИЕ ПОРОГА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ИНЖЕКЦИИ В ПЛАЗМУ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

С.Н.Громов, Л.Л.Ласечник, В.Ф.Семенюк

Экспериментально показано, что введение в плазму электронного пучка малой плотности позволяет значительно снизить порог параметрической неустойчивости и увеличить отбор энергии от внешнего высокочастотного (ВЧ) поля накачки.

Параметрические неустойчивости являются эффективным механизмом передачи энергии внешнего ВЧ поля плазме [1]. Одной из перспективных для ВЧ нагрева областей частот является область нижегибридного резонанса [2]. Однако, в реальных термоядерных устройствах при внешнем облучении плазмы ВЧ полем в этом диапазоне частот следует ожидать, что параметрические неустойчивости будут развиваться в периферийных областях [3], где и произойдет основное поглощение ВЧ мощности. Это обуславливает спад плотности ВЧ энергии в центре плазменного объема ниже пороговой для возбуждения параметрической неустойчивости, что в итоге приводит к снижению эффективности ВЧ нагрева.

Изложенные ниже результаты экспериментов показывают, что комбинированное воздействие на плазму ВЧ поля и электронного пучка малой плотности ($n_b/n_e < 0,1$, где n_b и n_e плотности пучка и плазмы соответственно), снижая порог параметрической неустойчивости, увеличивает эффективность ВЧ нагрева и позволяет снять отмеченные выше затруднения.

Плазма создавалась в алундовой трубе длиной 60 см и диаметром 6 см пространственно-периодическим ВЧ полем [4]. Вся система помещалась в однородное продольное магнитное поле $H = 1000$ э. Частото-

та накачки $f_0 \approx 21$ МГц лежала в области нижнегибридного резонанса. Электронный пучок диаметром ~ 1 см создавался с помощью термоэмиттера, помещенного на оси системы в области однородной плазмы. В качестве измерительных средств использовались ВЧ зонды и подвижный электростатический многосеточный анализатор энергий электронов. Рабочим газом служил гелий при давлении $\sim 10^{-3}$ мм рт.ст. Концентрация электронов n_e лежала в пределах $5 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$.

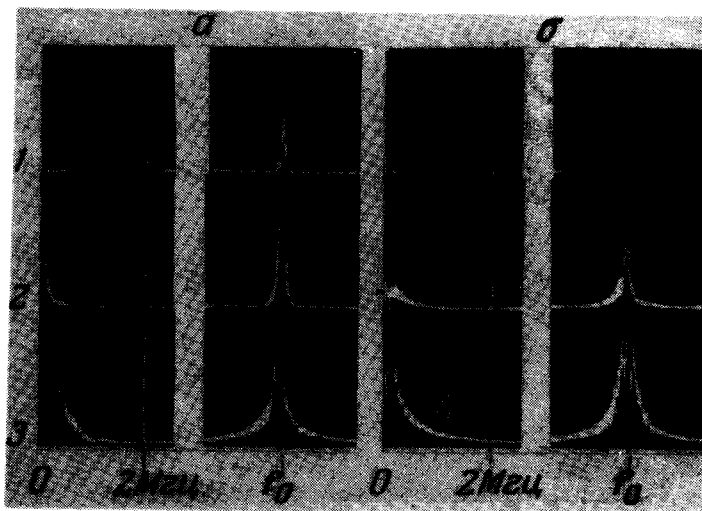


Рис. 1. Спектры колебаний в плазме: *a* – в отсутствие пучка для различных напряжений U_0 , в: 1 – 30, 2 – 60, 3 – 125; *б* – для различных токов пучка в допороговых условиях, I_b , ма: 1 – 0, 1, 2 – 0, 8, 3 – 10. Энергия пучка 200 эв

В отсутствие электронного пучка, при превышении полем накачки, определяемым напряжением U_0 на возбуждающей системе, некоторого порогового значения наблюдается (рис. 1, *a*) развитие аperiodической параметрической неустойчивости с возбуждением медленной звуковой волны [5]. Если же порог возбуждения не достигнут, то в плазме регистрируется ВЧ сигнал лишь на частоте накачки f_0 (кадр 1).

При включении электронного пучка аналогичное возбуждение низкочастотных (НЧ) колебаний и симметричное относительно частоты уширение спектра в области высоких частот происходит уже в допороговых условиях. Возникновение колебаний наблюдается, начиная с некоторых значений тока пучка ($I_b \approx 0,3$ ма). Дальнейшее увеличение тока пучка приводит к возрастанию амплитуды НЧ колебаний и уширению спектров в НЧ и ВЧ областях. Изменение энергии пучка в диапазоне 100 – 300 эв не оказывало влияния на вид спектров, наблюдаемых колебаний и их интенсивность.

При напряженностях поля накачки выше пороговой, пучок также приводит к нарастанию интенсивности колебаний, хотя величина тока пучка, оказывающего влияние на параметрическую неустойчивость, повышалась с ростом напряженности поля накачки. Таким образом, вве-

дением в плазму электронного пучка можно дополнительно регулировать уровень развития параметрической неустойчивости.

Инжекция пучка в допороговых условиях одновременно с возбуждением колебаний сопровождалась значительным увеличением энергосодержания плазмы: возрастали как ее концентрация, так и электронная температура T_e (от 7 до 20 эВ), измеренная на периферии плазмы вне пучка. Для достижения таких же значений T_e в отсутствие пучка требовалось четырехкратное превышение порогового значения поля накачки. Наблюдаемое увеличение энергосодержания плазмы значительно превышает то, которое может быть получено даже при 100-процентном поглощении энергии пучка (рис. 2). При расчете учитывался лишь основной вид потерь, связанный с продольным уходом частиц из системы, т. е. кривая 2 рис. 2 даже несколько завышена.

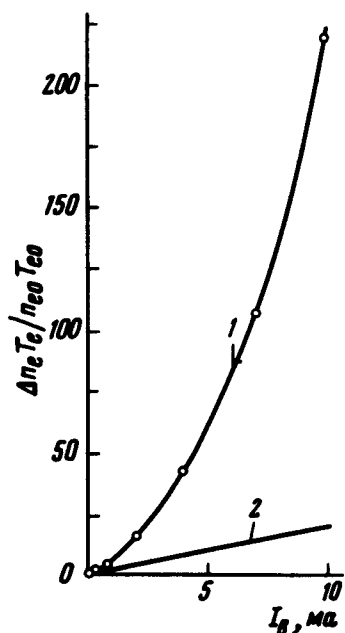


Рис. 2. Экспериментальное (1) и расчетное (2) относительное энергосодержание плазмы в зависимости от тока пучка. $n_{e0} T_{e0}$ — энергосодержание плазмы в отсутствие пучка при $U_0 = 30$ в

Следовательно, наблюдаемое возрастание энергосодержания плазмы может происходить только за счет увеличения отбора энергии от внешнего ВЧ поля. Этот факт, а также подобие спектров колебаний позволяет рассматривать электронный пучок как некоторый спусковой механизм данной параметрической неустойчивости, понижающий порог ее возбуждения и улучшающий условия поглощения энергии внешнего ВЧ поля плазмой.

Причина понижения порога параметрической раскачки при инжекции электронного пучка остается пока неясной, но, возможно, что это понижение связано с уменьшением декремента высокочастотных волн в такой системе.

Авторы признательны В.В.Пустовалову, А.Б.Романову, М.А.Савченко, В.П.Силину за полезное обсуждение результатов работы.

Литература

- [1] В.П.Силин. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М., изд. Наука, 1973.
- [2] M. Porkolab, V. Arunasalam, N. C. Luhmann. Plasma Phys., 17, 405, 1975; В.Ф.Тарасенко, А.Б.Киценко, В.И.Панченко, К.Н.Степанов. ЖТФ, 42, 1996, 1972.
- [3] В.В.Аликаев, В.Е.Голант, К.Н.Степанов. Сб. "Системный анализ и конструкции термоядерных станций. Совместный семинар СССР – США, 1974", Л., 1974, стр. 16.
- [4] Л.Л.Пасечник, В.Ф.Семенюк. ЖТФ, 43, 1071, 1973.
- [5] Л.Л.Пасечник, В.Ф.Семенюк. ЖТФ, 45, 779, 1975.
-