

## НАБЛЮДЕНИЕ УСИЛЕННОГО РАССЕЯНИЯ СВЧ ВОЛН В ТОКАМАКЕ НА КОЛЕБАНИЯХ НИЖНЕГИБРИДНОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

*В.О.Александров, В.Н.Будников, Г.В.Герасименко,  
В.В.Дьяченко, Л.А.Есипов, А.М.Ларионов, К.М.Новик,  
А.Д.Пилюя, И.Е.Сахаров, А.Н.Савельев,  
А.Ю.Степанов, О.Н.Щербинин*

Описаны выполненные впервые на токамаке эксперименты по усиленному рассеянию СВЧ волн области верхнего гибридного резонанса на возбужденных извне нижегибридных колебаниях. Обнаружены сильнозамедленные волны, которые не могут быть объяснены в рамках линейной теории распространения нижегибридных волн.

Эксперименты по наблюдению коротковолновых колебаний нижегибридного диапазона частот в токамаке методом усиленного рассеяния, т.е. рассеяния из области гибридного резонанса зондирующей волны<sup>1-4</sup> были выполнены на установке ФТ-2 ( $R = 55$  см,  $a = 8$  см,  $B_T = 10 - 14$  кГс,  $I_p = 20$  кА,  $n_0 = 2 \cdot 10^{12} \div 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e = 300$  эВ,  $T_i \approx 70$  эВ). Схема эксперимента приведена на рис. 1. С помощью двухволноводного грилла к плазме подводилось

40 – 150 кВт высокочастотной мощности на частоте  $f_L = 925$  МГц, которая вдвое превосходила частоту нижнего гибридного резонанса. Зондирующее излучение в виде необыкновенной волны на частоте  $f_0 = 35$  ГГц при мощности около 1 Вт вводилось с помощью рупора, расположенного со стороны сильного магнитного поля. Этот же рупор использовался как приемная антенна для рассеянного сигнала.

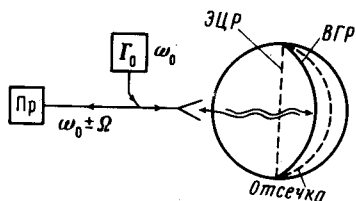


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента

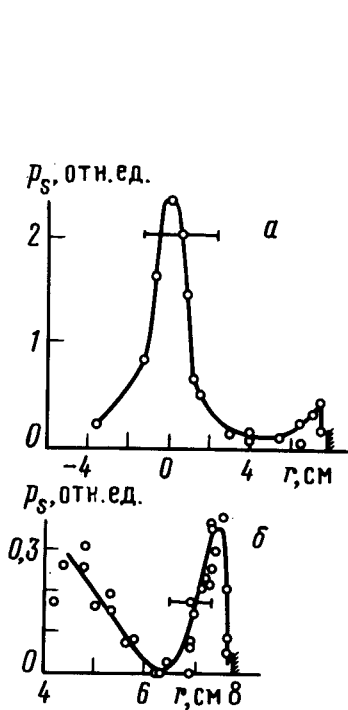


Рис. 2

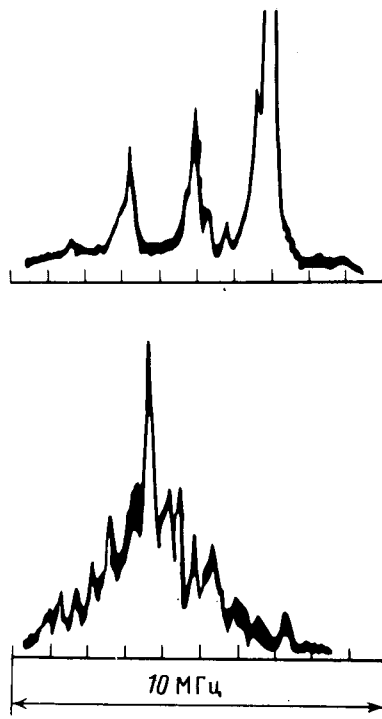


Рис. 3

Рис. 2. Пространственное распределение рассеянного сигнала: а -  $n_0 = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; б -  $n_0 = (0,5 \div 2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Рис. 3. Примеры спектров рассеянного излучения

Согласно теоретическим представлениям, рассеяние зондирующей волны на низкочастотных колебаниях должно резко возрастать при наличии в плазме доступной поверхности верхнего гибридного резонанса для этой волны. Рассеянный сигнал при этом формируется в узком слое в окрестности гибридного резонанса, где происходит замедление зондирующей волны и возрастание ее амплитуды. В эксперименте зондирование плазмы проводилось при разных значениях тороидального магнитного поля  $B_T$  и концентрации на оси разряда  $n_0$ . Рассеянный сигнал, состоящий из двух линий с частотами  $f_S = f_0 \pm f_L$  примерно равной интенсивности, наблюдался только при таких  $n_0$  и  $B_T$ , при которых внутри камеры выполнялись условия верхнего гибридного резонанса для частоты  $f_0$ . При изменении поляризации зондирующей волны

из необыкновенной в обыкновенную происходило резкое (двадцатикратное) уменьшение сигнала. Оба этих факта указывают на связь наблюдаемого рассеяния с верхним гибридным резонансом зондирующей волны. Считая, таким образом, механизм рассеяния установленным, можно было получить сведения о пространственном распределении источника сигнала, изменяя положение поверхности гибридного резонанса в камере, что достигалось изменением  $B_T$ . Можно думать, что при отсутствии нижнего гибридного резонанса изменение  $B_T$  на  $\pm 15\%$  не влияло существенным образом на распространение вводимых в плазму волн. При малых концентрациях ( $n_0 \leq 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) доступным для зондирования было все сечение камеры, а при больших  $n_0$  — только ее внешняя периферия. Примеры зависимости интенсивности рассеянного сигнала от положения верхнего гибридного резонанса приведены на рис. 2. Согласно теории, рассеянный сигнал пропорционален интегралу от спектральной плотности флуктуаций с некоторой весовой функцией, подчеркивающей большие значения волновых векторов. Следовательно, кривые на рис. 2 могут отражать как изменение интенсивности флуктуаций, так и изменение их спектра. Однако, они во всяком случае свидетельствуют о том, что колебания, ответственные за рассеяние, заполняют весь объем камеры. Оценку длин волн этих колебаний можно получить, сравнивая расчетное значение "фактора усиления" (отношение рассеянных мощностей при наличии верхнего гибридного резонанса и при его отсутствии), зависящее от некоторой средней длины волны колебаний мишени  $\bar{\lambda}$ , с его измеренной величиной. Оно оказалось  $\geq 100$ . Отсюда для характерной длины волны флуктуаций получается  $\lambda \leq 2 \text{ мм}$ .

Примеры частотных спектров рассеянного сигнала (одной линии) представлены на рис. 3. Зависимость интенсивности рассеянного сигнала от величины нижегибридной мощности оказалась линейной. Отношение рассеянной мощности к зондирующей составляло  $10^{-7} \div 10^{-9}$ .

Идентификация колебаний, ответственных за рассеяние, встречает значительные трудности. Приведенной выше оценке  $\bar{\lambda}$  соответствует значение показателя преломления  $N_{\perp} \cong 150$ . В рассматриваемом диапазоне частот существуют две моды колебаний с таким сильным замедлением — косые ленгмюровские волны, к которым относится наиболее коротковолновая часть спектра, излучаемого гриллом, и ионные моды Бернштейна. В случае косых ленгмюровских волн из дисперсионного уравнения  $N_{\parallel} \geq 15$ , что соответствует очень сильному затуханию на электронах. Согласно линейной теории распространения, волны с такими большими значениями продольного замедления во всяком случае не могут проникнуть в центральную часть разряда.

Что касается бернштейновских мод, то возможной причиной их возникновения может быть рассеяние ленгмюровских волн на низкочастотных коротковолновых колебаниях. Колебания с  $\lambda \cong 1 \div 5 \text{ мм}$ ,  $f = 3 \div 15 \text{ МГц}$  были ранее обнаружены в токамаке ФТ-2 по рассеянному излучению  $\text{CO}_2$ -лазера, причем волновой вектор их лежал в плоскости малого сечения тора<sup>5</sup>. При рассеянии на таких колебаниях увеличивается  $N_{\perp}$  при сохранении  $N_{\parallel}$ . Но в присутствии мод Бернштейна на радиальных распределениях рассеянного сигнала (рис. 2) следовало бы ожидать структуры, связанной с поверхностями гармоник ионного циклотронного резонанса. На опыте такие структуры не наблюдаются — это, возможно, связано с тем, что радиальные профили построены по данным, полученным в различных разрядах.

Независимым указанием на присутствие в плазме достаточно интенсивных коротковолновых колебаний является наблюдаемый в условиях описанных экспериментов нагрев ионов с эффективностью 0,5 эВ/кВт и образование быстрых "хвостов" на ионной функции распределения.

#### Литература

1. Пилия А.Д. ЖТФ, 1966, 36, 2195.
2. Будников В.Н., Варфоломеев В.И., Новик К.М., Пилия А.Д. Физика плазмы, 1980, 6, 1050.
3. Архипенко В.И., Будников В.Н., Гусаков Е.З., Романчук И.А., Симончик Л.В. Письма в ЖЭТФ, 1984, 38, 453.

4. Будников В.Н., Кондратьева Л.В., Новик К.М., Пиля А.Д., Селенин В.Л. Intern. Conf. on Plasma Phys., Lausanna, 1984, 11, 307.

5. Аскинази Л.Г., Будников В.Н., Буланин В.В., Есипов Л.А., Корнеев Д.О., Сахаров И.Е., Степанов А.Ю., Ушаков С.Н. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 1517.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

---

Поступила в редакцию  
8 июля 1985 г.