

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ОКРЕСТНОСТИ ГИБРИДНОГО РЕЗОНАНСА

В.И.Архипенко, В.Н.Будников, Е.З.Гусаков, В.Л.Селенин, Л.В.Симончик

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН
194021 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 16 февраля 1994 г.

Обнаружен эффект задержки коротких импульсов зондирующего микроволнового излучения в области гибридного резонанса в неоднородной плазме. Продемонстрирована возможность измерений волновых векторов коротковолновых плазменных колебаний с помощью метода, основанного на этом эффекте. В лабораторной плазме проведены одновременные измерения спектров по частотам и волновым векторам ионно-звуковых волн.

Согласно существующим представлениям в окрестности гибридного резонанса в неоднородной плазме происходит резкое уменьшение пространственного масштаба электромагнитного поля и рост проекции электрического поля волны на направление неоднородности плазмы [1]. В этой же области в соответствии с результатами теоретического анализа должно происходить существенное замедление переходных процессов [2] и распространения электромагнитных импульсов [3]. При этом время, необходимое для достижения импульсом характерного волнового числа k_i , пропорционально значению этого волнового числа. Последнее предсказание представляет значительный интерес в связи с возможностью использования этого эффекта замедления с целью создания время-пролетной диагностики плазменных флуктуаций, основанной на рассеянии электромагнитных волн в области гибридного резонанса [3, 4]. Следует отметить, что до последнего времени не было прямых наблюдений задержки электромагнитных импульсов в окрестности гибридных резонансов, что, естественно, сдерживало развитие диагностических приложений. Настоящая статья восполняет этот пробел. Эксперимент выполнен на линейной плазменной установке [5]. В баллоне диаметром 2 см и длиной 1 м, заполненном аргоном при давлении $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. и помещенном в магнитное поле 3 кГс, с помощью электронно-циклотронного пробоя создавалась плазма, неоднородная как радиально, так и аксиально $n_e = n_e(r, Z)$. Максимальная концентрация электронов $n_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, электронная температура $T_e \sim 2 \text{ эВ}$. С помощью волноводного ввода к плазме подводилась электромагнитная волна на частоте $f_i = 2,33 \text{ ГГц}$, для которой в плазме в точке, где концентрация электронов на оси баллона равнялась критической $n = n_c = \pi f_i^2 m_e / e^2$, были выполнены условия гибридного резонанса [5]. С помощью специально разработанного модулятора формировалась последовательность импульсов микроволнового излучения длительностью 7нс, глубиной модуляции 40дБ и периодом повторения 100нс.

Замедление распространения микроволнового импульса в области гибридного резонанса исследовалось по задержке сигнала его рассеяния на ионно-звуковых волнах, независимо возбужденных в результате параметрической распадной неустойчивости [6].

Время задержки сигнала рассеяния t_d равно удвоенному времени распространения электромагнитной волны до точки Z_S пространственного синхронизма, где выполнено условие $2K_{iz}(Z) = q$, ($K_{iz}(Z)$ и q_z - соответственно, волновые числа зондирующей волны и ионно-звуковых флуктуаций). Согласно теоретическому анализу [3], время задержки дается выражением

$$t_d = \int_{Z_0}^{Z_S(q)} \frac{dZ}{\partial\omega_i/\partial K_Z} = q \frac{\partial Z_r}{\partial\omega_i} + t_W, \quad (1)$$

где $\omega_i = 2\pi f_i$; $\partial\omega_i/\partial K_Z$ - проекция групповой скорости зондирующей волны на направление неоднородности; Z_r - положение точки гибридного резонанса, в окрестности которой находится точка Z_S ; Z_0 - положение источника излучения, а t_W - время распространения сигнала вдали от области резонанса.

Условие гибридного резонанса в описываемом эксперименте имеет вид $\omega_{pe}(0, Z) = \omega_i$, что позволяет получить для времени задержки выражение

$$t_d = \frac{2qa}{\omega_i} + t_W, \quad (2)$$

где $a = (1/n \, dn/dZ)^{-1}$ - масштаб неоднородности плотности плазмы вдоль магнитного поля. Согласно данным резонаторной диагностики $a = 4$ см.

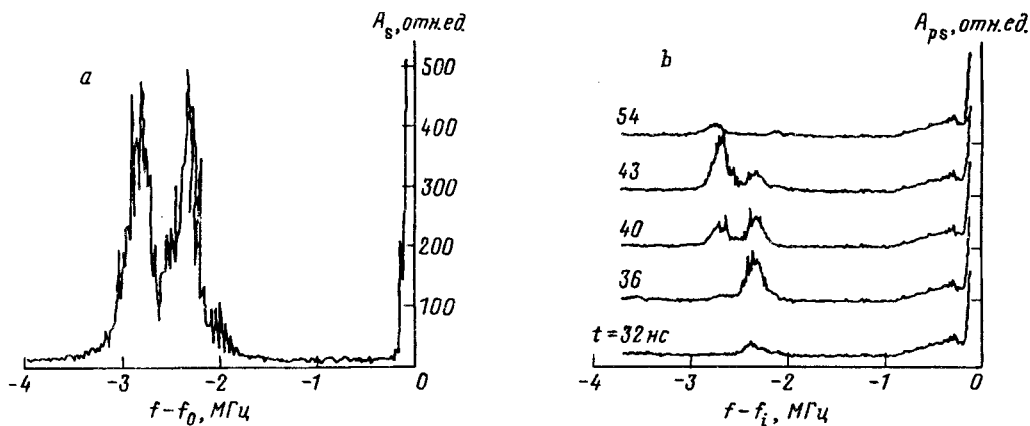


Рис.1. а - Спектры рассеяния волны накачки, параметрически возбуждающей ионно-звуковую волну; б - импульсной зондирующей волны

Измерение времени задержки сигнала рассеяния проводилось с помощью схемы, вырезавшей из сигнала рассеяния короткий импульс длительностью 7 нс с фиксированной задержкой $t < 100$ нс относительно зондирующего импульса и позволявшей осуществлять спектральный анализ последовательности таких рассеянных импульсов. На рис.1 приведены данные измерений спектров рассеянного сигнала для различных времен задержки в случае, когда в плазме в результате параметрической неустойчивости возбуждалась ионно-звуковая волна, состоящая из двух спектральных компонент на частотах $f_S = 2,3$ МГц и $2,8$ МГц (рис.1а).

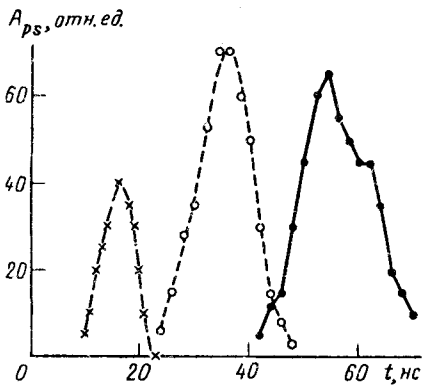


Рис.2

Рис.2. Зависимость максимальной амплитуды спектра рассеяния от времени задержки измерения для различных частот ионно-звуковых волн

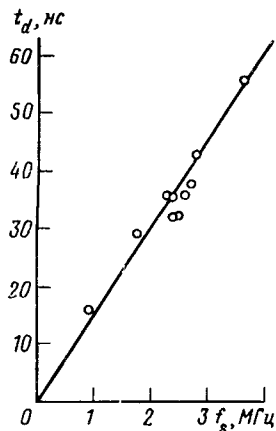


Рис.3

Рис.3. Зависимость времени задержки сигнала рассеяния от частоты ионно-звуковой волны

Как показывают измерения, сигнал рассеяния практически отсутствует при малых временах задержки $t < 30$ нс, и лишь при $t = 32$ нс в спектре рассеяния появляется одна линия, сдвинутая на 2,3 МГц относительно линии зондирующей волны. При $t = 36$ нс амплитуда этой линии достигает максимального значения, а при больших временах задержки $t = 40$ нс — падает. Одновременно в спектре рассеяния появляется линия, сдвинутая на 2,8 МГц, которая достигает максимальной амплитуды при $t = 43$ нс, и резко уменьшается уже при $t = 54$ нс.

На рис.2 приведена зависимость амплитуды рассеяния A_{pS} для различных частот возбужденных в плазме ионно-звуковых волн от времени задержки измерения рассеянного сигнала. Обращает на себя внимание небольшая продолжительность сигнала рассеяния, близкая по величине к длительности зондирующего импульса.

Кроме того, существенным обстоятельством является сильная зависимость времени задержки сигнала рассеяния от частоты ионно-звуковой волны, изменяющегося от 18 нс для $f_s = 1$ МГц до 57 нс в случае $f_s = 3,6$ МГц.

Зависимость времени задержки рассеянного сигнала от частоты ионно-звуковой волны, определенная по положению максимума зависимости $A_{pS}(t)$, приведена на рис.3. Как видно, экспериментальные точки группируются около теоретической прямолинейной зависимости, полученной из (2) в предположении $q = 2\pi f_s / C_S$ и построенной для $a = 4$ см, а $C_S = \sqrt{T_e / m_{Ar}} = 2,2 \cdot 10^5$ см/с, отвечающей $T_e = 2$ эВ.

Такое соответствие измеренных задержек сигнала рассеяния в области гибридного резонанса с теоретическими предсказаниями (2) позволяет заключить, что они связаны с существенным замедлением распространения зондирующей волны в резонансной зоне. Отметим, что за то же время $t_d = 50$ нс, за которое зондирующий импульс проходит расстояние, не превышающее 100 см, электромагнитная волна в вакууме прошла бы путь $1,5 \cdot 10^3$ см.

Показанный прямолинейный характер зависимости подтверждает правильность теоретических представлений о том, что время замедления импульса

в окрестности гибридного резонанса до волнового числа K ; пропорционально этому волновому числу. Это обстоятельство позволяет использовать данные рассеяния коротких импульсов в окрестности гибридного резонанса для определения спектра низкочастотных флуктуаций плазмы как по частотам, так и по волновым векторам.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № 93-02-16912).

-
1. В.Е.Голант, А.Д.Пилюя, УФН **14**, 413 (1971).
 2. Т.А.Давыдова, Физика плазмы **7**, 921 (1981).
 3. Е.З.Гусаков, А.Д.Пилюя, Письма в ЖТФ **18**, 63 (1992).
 4. Б.Брюесхабер, Е.З.Гусаков, М.Краемер, А.Д.Пилюя, Письма в ЖТФ **19**, 21 (1993).
 5. В.И.Архипенко, В.Н.Будников, И.А.Романчук, Л.В.Симончик, Физика плазмы **7**, 396 (1981).
 6. В.И.Архипенко, В.Н.Будников, Е.З.Гусаков и др., Физика плазмы **13**, 693 (1987).