

УДК 533.9; 533.951

М. С. Коржавина, А. В. Аникеев, П. А. Багрянский

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

Email: m.s.korzhavina@inp.nsk.su

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОНЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В АНИЗОТРОПНОМ ПЛАЗМОИДЕ ИОНОВ С ТЕРМОЯДЕРНЫМИ ЭНЕРГИЯМИ *

В работе представлены результаты по исследованию микронеустойчивостей в анизотропном сгустке ионов со средней энергией 13 кэВ и плотностью $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Плазмоид создавался в дополнительном компактном пробкотроне, присоединенном к одной из сторон установки ГДЛ. Для создания плотного сгустка ионов с сильной анизотропией функции распределения в компактный пробкотрон, заполненный теплой проточной плазмой из центральной части ГДЛ, производилась перпендикулярная инжекция сфокусированных атомарных пучков с энергией частиц ~ 20 кэВ и суммарной мощностью около 1 МВт. Для определения типа и параметров развивающейся микронеустойчивости были использованы специальные высокочастотные электростатические и магнитные зонды. Развивающаяся микронеустойчивость является альфвеновской ионно-циклотронной, о чем свидетельствуют малые азимутальные волновые числа, частота колебаний ниже ионно-циклотронной частоты и вращение вектора поляризации магнитного поля в направлении ларморовского движения ионов. Был определен порог развития микронеустойчивости относительно основных параметров плазмоида.

Ключевые слова: плазма и УТС, магнитное удержание, волны в плазме.

Введение

В физике открытых ловушек одной из ключевых проблем является проблема продольного удержания плазмы. Эффективное ее решение – создание амбиполярного барьера в так называемых дополнительных пробкотронах [1]. Амбиполярный потенциал создается быстрыми ионами с анизотропной в фазовом пространстве функцией распределения, которые образуются в результате, например, инжекции атомарных пучков поперек магнитного поля. В ранее проводимых исследованиях по созданию амбиполярного барьера, экспериментаторы столкнулись с проблемой развития различных микронеустойчивостей, которые были связаны с сильной анизотропией плазмы [2–5]. Эти неустойчивости приводили к быстрому рассеянию частиц в конус потерь и тем самым уменьшали эффект амбиполярного запираения. Поэтому изучение микронеустойчивостей является важной фундаментальной задачей физики плазмы и УТС.

На установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) [6; 7] в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН проводятся эксперименты по созданию и удержанию плотного ионного сгустка с сильной анизотропией функции распределения в дополнительном компактном пробкотроне (КП). Высокая плотность быстрых ионов по отношению к плотности мишенной плазмы и сильная степень анизотропии (отношение средней поперечной кинетической энергии частиц к средней продольной) в этих экспериментах могут влиять на развитие двух наиболее опасных микронеустойчивостей: дрейфово-конусной и альфвеновской ионно-циклотронной.

Данная работа посвящена изучению микронеустойчивости, развивающейся в анизотропном плазмоиде ионов с термоядерными энергиями, удерживаемых в КП ГДЛ. Целью работы было экспериментальное установление типа микронеустойчивости и определение порога ее возникновения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП (РНП 2.1.1/579).

Компактный пробкотрон на установке ГДЛ

Газодинамическая ловушка (рис. 1) представляет собой аксиально-симметричный пробкотрон с большим пробочным отношением для удержания двухкомпонентной плазмы [6; 7]. Одна компонента представляет собой плотную столкновительную водородную плазму с температурой несколько электрон-вольт («мишенная плазма»). Она создается в начале эксперимента в центральной части ловушки при помощи дугowego источника плазмы и удерживается в газодинамическом режиме. После заполнения ловушки мишенной плазмой включаются нагревные инжекторы. Пучки водорода или дейтерия с энергией 18–23 кэВ инжектируются в центр установки и захватываются мишенной плазмой, образуя вторую компоненту – популяцию быстрых ионов. Эти ионы удерживаются адиабатически и постепенно тормозятся на мишенной плазме, нагревая ее до температуры ~ 150 эВ. Длительность работы нагревных инжекторов составляет 5 мс. За это время в ловушке успевает накопиться популяция быстрых ионов со средней энергией около 10 кэВ и плотностью в точках остановки до $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

В 2004 г. на установке ГДЛ начаты эксперименты по формированию и исследованию синтезированного сгустка ионов с сильной анизотропией функции распределения и термоядерными параметрами, создаваемого в дополнительном пробкотроне установки ГДЛ (Synthesised Hot Ion Plasmoid – SHIP) [8]. Для создания компактного пробкотрона было произведено изме-

нение конструкции пробочного узла установки ГДЛ, а именно дополнительная вакуумная камера и катушка установлены вблизи имеющегося пробочного узла (см. рис. 1). Магнитное поле в центральном сечении КП составляет $B_0 = 24$ кГс, пробочное отношение $R = 2$, расстояние между центрами пробочных катушек ~ 43 см, внутренний диаметр вакуумной камеры ~ 70 см. Для создания плотного анизотропного сгустка ионов в компактный пробкотрон (КП), заполненный из центральной части ГДЛ тепловой проточной плазмой с температурой 90 эВ и плотностью $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ на оси КП, перпендикулярно магнитному полю, производилась инжекция сфокусированных атомарных пучков с энергией 21–23 кэВ и суммарной мощностью около 1 МВт. В результате в КП удалось получить анизотропный плазмод горячих ионов со средней энергией 13 кэВ и плотностью $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что на порядок выше, чем плотность теплых ионов. Также экспериментально был продемонстрирован эффект амбиполярного запираения потока частиц в запробочную область ГДЛ. Плотность потока ионов из центральной ячейки уменьшалась в 5 раз вблизи оси установки при инжекции атомарных пучков в КП. При достижении некоторых критических параметров было зафиксировано появление колебаний потенциала плазмы на частотах, близких к ионно-циклотронной частоте, соответствующей магнитному полю в экваториальной плоскости КП. Это могло свидетельствовать о развитии микроустойчивости, вызванной сильной анизотропией функции распределения быстрых ионов в фазовом пространстве.

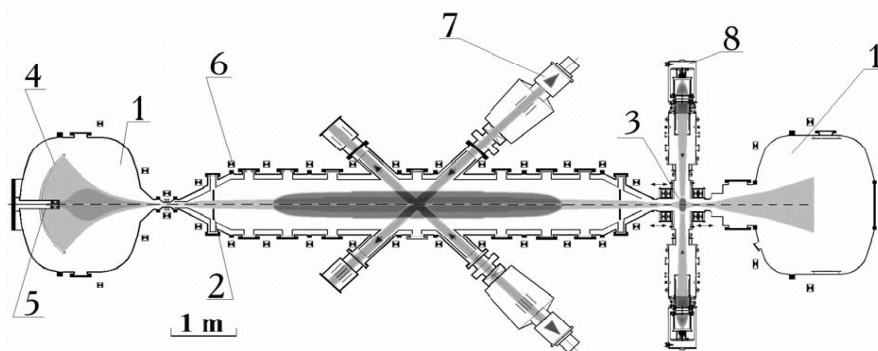


Рис. 1. Схема эксперимента с компактным пробкотроном на установке ГДЛ: 1 – торцевые баки; 2 – центральная секция; 3 – компактный пробкотрон; 4 – плазмодриемник; 5 – источник плазмы; 6 – катушки магнитной системы; 7 – нагревные инжекторы атомов; 8 – инжекторы для компактного пробкотрона

Экспериментальное определение типа микронеустойчивости в компактном пробкотроне ГДЛ. Результаты измерений

Для определения типа развивающейся в КП ГДЛ микронеустойчивости была использована система из высокочастотных электрических и магнитных зондов.

Исследуемые колебания носили ярко выраженный пороговый характер. На рис. 2 изображены зависимости диамагнетизма быстрых ионов в компактном пробкотроне и амплитуды высокочастотных колебаний на магнитном зонде в КП в зависимости от времени. Колебания наступали при превышении порогового значения диамагнетизма плазмоида, которое соответствует накопленной плотности быстрых ионов $n > 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, при средней энергии ионов 12–13 кэВ. При этом величина параметра β (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля) составила $\sim 0,02$, анизотропии (отношение средней поперечной кинетической энергии частиц $\langle E_{\perp} \rangle$ к средней продольной $\langle E_{\parallel} \rangle$) $A \sim 35$, а отношение ларморовского радиуса к характерному радиальному размеру плазмоида $a_i / R_p \approx 0,23$.

Для определения фаз и частот колебаний вычислялась спектральная плотность взаимной корреляционной функции двух сигналов с различных ВЧ зондов. На рис. 3 приведена относительная спектральная мощность взаимной корреляционной функции сигналов с двух зондов, расположенных по азимуту на одном радиусе в компактном пробкотроне. Узкий пик соответствует частоте колебаний потенциала плазмы $f_0 = 39,65 \pm 0,15 \text{ МГц}$, вызванных развитием исследуемой неустойчивости. Второй пик на спектре соответствует второй гармонике колебаний. Значение реального магнитного поля (с учетом диамагнетизма плазмы) в центре КП составило в этом эксперименте $27,6 \pm 0,3 \text{ кГс}$. Это минимальное значение магнитного поля в компактном пробкотроне. Ионно-циклотронная частота, соответствующая этому полю, $f_{ci} = 42 \pm 0,5 \text{ МГц}$. Таким образом, зафиксирован сдвиг частоты высокочастотных колебаний плазмы влево относительно минимально возможной в КП ионно-циклотронной частоты. Эта частота ВЧ колебаний плазмы удовлетворяет оценке

для частот альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости [5]:

$$f_0 < f_{ci} (1 - \langle E_{\parallel} \rangle / \langle E_{\perp} \rangle).$$

Азимутальный модовый состав колебаний определялся из разности фаз колебаний потенциала зондов, расположенных по азимуту в радиусе 4,5 см от оси в КП. На рис. 4 представлен анализ поперечных (азимутальных) мод. По оси абсцисс отложен угол между зондами в радианах, по оси ординат – разность фаз в радианах между зондами. Сплошная линия соответствует моде –1, пунктирная – моде –2. Как видно из рисунка, в большинстве измерений азимутальная мода колебаний с приемлемой точностью была равна –1, но иногда наблюдалась и вторая мода. Колебаний с более высокими модами не обнаружено. Для выбранной системы координат знак «минус» означает распространение в направлении электронного дрейфа.

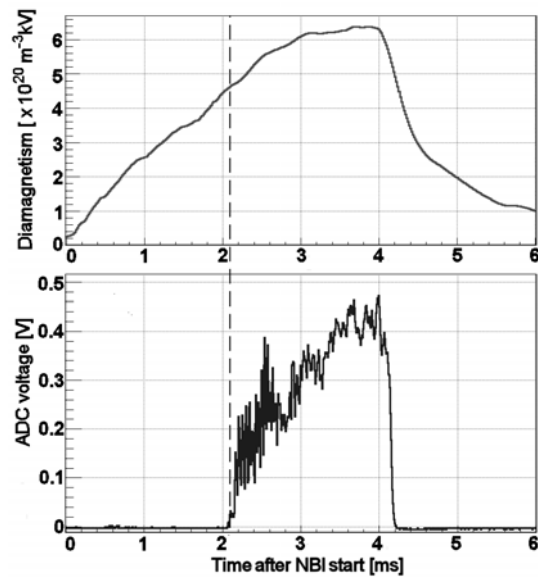


Рис. 2. Диамагнетизм быстрых ионов в компактном пробкотроне и амплитуда колебаний потенциала ВЧ зонда в зависимости от времени после начала инжекции в КП ГДЛ

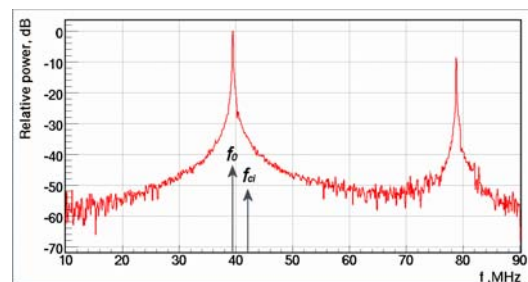


Рис. 3. Спектр ВЧ колебаний плазмы в компактном пробкотроне ГДЛ

На рис. 5 показаны напряжения, индуцированные на магнитных зондах радиальной и азимутальной компонентами вектора магнитного поля $\dot{B}_r(t)$ и $\dot{B}_\phi(t)$. Восстановленная по ним амплитуда возмущений магнитного поля была порядка 100 мГс. Зонд при этом находился в радиусе 15 см от оси установки. Вектор магнитного поля волны вращался на рисунке по часовой стрелке. Для геометрии эксперимента это соответствует направлению ларморовского вращения ионов (левая поляризация волны).

Регистрация малых поперечных мод колебаний волны, сдвига частоты волны относительно ионно-циклотронной в центральном сечении КП, вращения вектора поляризации магнитного поля волны в направлении ларморовского движения ионов является весомым аргументом в пользу того, что колебания в плазмоиде связаны с развитием альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости.

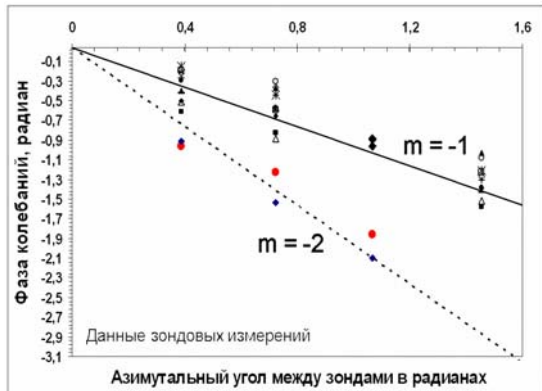


Рис. 4. Анализ поперечных мод колебаний

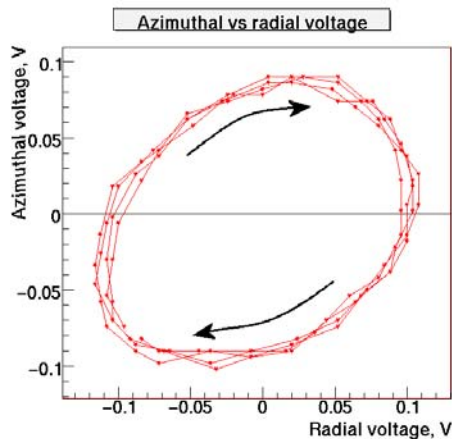


Рис. 5. Напряжения на магнитном зонде, индуцированные изменением радиальной и азимутальной компонентами вектора магнитного поля волны

Разность фаз между сигналами с находящихся на одной силовой линии зондов (зонд в компактном пробкотроне и зонд в расширителе) от выстрела к выстрелу была случайна. Это означает, что продольная длина волны исследуемых колебаний много меньше, чем расстояние между зондами (~ 70 см), и колебания не относятся к желобковому типу и, следовательно, не являются результатом развития дрейфово-конусной микронеустойчивости. Этот же вывод подтверждают данные измерений с помощью системы из трех ВЧ зондов, расположенных на расстоянии 1,5 см на одной силовой линии в расширителе. Согласно результату взаимного корреляционного анализа сигналов с этих зондов, продольная длина волны колебаний не превышает 2 см.

Заключение

Приведем основные результаты, полученные в ходе данной работы. С помощью электрических и магнитных ВЧ зондов проведены исследования микрофлуктуаций плазмы в компактном пробкотроне ГДЛ, вызванных сильной анизотропией функции распределения ионов в пространстве скоростей. Амплитуда флуктуаций составила примерно 100 мГс.

Развивающаяся микронеустойчивость является альфвеновской ионно-циклотронной. Об этом свидетельствуют малые азимутальные волновые числа $m = 1-2$, частота колебаний ниже ионно-циклотронной частоты в области минимума магнитного поля компактного пробкотрона и вращение вектора поляризации в направлении ларморовского движения ионов.

Определен порог развития микронеустойчивости относительно плотности быстрых ионов, относительного давления β , степени анизотропии A и отношения ларморовского радиуса к радиусу плазмоида. Неустойчивость развивалась при плотности быстрых ионов $n > 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\beta \approx 0,02$, анизотропии $A \approx 35$, $a_i / R_p \approx 0,23$.

Список литературы

1. Димов Г. И. Амбиполярная ловушка // УФН. 2005. Т. 175, № 11. С. 1185–1206.
2. Scharer J. Ion-cyclootron instabilities resulting from a thermally anisotropic plasma // Plasma Phys. 1969. Vol. 11. P. 1–10.

3. *Simonen T. C.* Measurements of ion cyclotron instability characteristics in a mirror-confined plasma // *Phys. Fluids*. 1976. Vol. 19. P. 1365–1370.

4. *Kanaev B. I.* Stabilization of drift loss-cone instability (DCI) by addition of cold ions // *Nucl. Fusion*. 1979. Vol. 19. P. 347–359.

5. *Casper T. A., Smith G. R.* Observation of Alfvén Ion-Cyclotron Fluctuation in the End-Cell Plasma in the Tandem Mirror Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 1982. Vol. 48. P. 1015–1018.

6. *Мирнов В. В., Рютов Д. Д.* Газодинамическая линейная ловушка для удержания плазмы // *Письма в ЖТФ*. 1979. Т. 5. С. 678–682.

7. *Рютов Д. Д.* Открытые ловушки / Препринт ИЯФ СО АН СССР 87-105П. Новосибирск, 1987.

8. *Anikeev A. V., Bagryansky P. A., Ivanov A. A., Lizunov A. A., Murakhtin S. V., Prikhodko V. V., Solomakhin A. L., Noack K.* Confinement of Strongly Anisotropic Hot-ion Plasma in a Compact Mirror // *Journal of Fusion Energy*. 2007. Vol. 26. P. 103–107.

Материал поступил в редколлегию 20.11.2008

M. S. Korzhavina, A. V. Anikeev, P. A. Bagryansky

STUDY OF MICROINSTABILITIES IN ANISOTROPIC PLASMOID OF THERMONUCLEAR IONS

The following article presents the results of investigation of microinstabilities in the anisotropic synthesized hot ion plasmoid (SHIP). Plasmoid is located in a small mirror section that is installed at one side of the GDT facility in Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, which is an axially symmetric magnetic mirror device of gas dynamic trap type. The magnetic field on axis is in the range of 2.5 Tesla and the mirror ratio is ~ 2 . The additional mirror section is filled with background plasma streaming from the central cell of GDT. To create the population of hot ions with strong anisotropy two focused neutral beams with energy of 21–23 keV are injected perpendicularly to the direction of magnetic field. Ionisation of the beams generates the high-energetic ion component with the density of about $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and mean energy about 13 keV. The distribution function of fast ions is thus strongly anisotropic in the phase space with the ratio $\langle E_{\perp} \rangle / \langle E_{\parallel} \rangle \sim 50$. To define the type and the parameters of the developing microinstability a set of high-frequency electrostatic and magnetic probes was used. The microinstability observed in the additional section of GDT is the Alfvén ion cyclotron instability (AIC), because of small azimuthal wave numbers, magnetic field vector rotating in the direction of ion gyration and oscillation frequency below the actual ion cyclotron frequency. AIC instability threshold was registered at the following plasma parameters: fast ion density $n > 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, ratio of ion pressure to magnetic field pressure $\beta \approx 0.02$, anisotropy $A \approx 35$, $a_i / R_p \approx 0.23$, where a_i is the ion gyroradius and R_p is the plasmoid radius.

Keywords: plasma physics and controlled thermonuclear synthesis, magnetic confinement, waves in plasma.