УДК 533.9.07

ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В СОВРЕМЕННЫХ СТЕЛЛАРАТОРАХ С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

© А.Е. Петров

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Аннотация. *В настоящем обзоре представлены примеры создания и успешной работы 2-мм диагностики на стеллараторах Л-2М (Москва), ATF (США), TJ-1U (Испания), TJ-II(Испания). Показана возможность получения данных о параметрах низкочастотных флуктуаций плазмы в центральной области плазменного шнура тороидальных термоядерных установок и их анализа.*

Введение.

Для изучения флуктуаций плотности в горячей плазме тороидальных термоядерных установок необходима бесконтактная методика. К таковой относится коллективное рассеяние на флуктуациях плотности, с дальнейшим анализом параметров рассеянного излучения, несущих информацию о рассеивающих колебаниях.

Эта диагностика даёт возможность измерять такие параметры плазмы, как уровень флуктуаций (в частности плотности), спектры по частотам и волновым векторам. В данном обзоре обсуждается диагностика, которая позволяет измерять флуктуации плотности. Необходимость этой информации достаточно велика, поскольку удержание плазмы и процессы аномального переноса в тороидальных термоядерных установках связаны с флуктуационными полями и с турбулентностью, превышающими уровень теплового шума, в частности, с флуктуациями плотности плазмы [1,2].

Диагностики 2-мм рассеяния применялись на термоядерных тороидальных установках (стеллараторного типа) Л-2 (Россия) [3,4], ATF (США) [5] и TJ-1U (Испания) [6], TJ-II(Испания) [7]. Параметры плазмы каждой из установок указаны в таблице 1.

Таблица 1. *Основные размеры установок и характеристики плазмы.*

Установки	Л-2	TJ-IU	ATF	TJ-1I
Большой радиус R, см	100	60	210	150
Среднее значение малого радиуса a, см	11,5	10	27	10-22.
Магнитное поле B, T	1,3-1,4	0.67	1.9	<1.2
Вводимая СВЧ мощность P_0, кВт	150-200	200	300	200-400
Средняя плотность $\langle n \rangle \geq 10^{13}$, $см^{-3}$	1,0-2,5	1,0	1,0	<1,0
Температура электронов в центре плазменного шнура $T_e(0)$, эВ	400-800	300-400	1000	500-800
Относительная величина флуктуаций на краю плазмы $(\Delta n/n)_{внеш}$	0,2-0,25	0,2-0,25	0,001–0,005	0,2-0,25
Длительность стационарной фазы импульса, мс	10-12	~ 10	20000	200-300

При реализации диагностик 2-мм рассеяния в качестве источника зондирующего излучения использовались так называемые генераторы дифракционного излучения (ГДИ) [8] с длиной волны от 1,5 до 2,5 мм, как юстируемые, так и пакетированные. Выходная мощность составляла от 0,1 до 0,5 Вт в зависимости от лампы. ГДИ отличаются низким КПД, но высокой стабильностью параметров выходного излучения.

В качестве приемных устройств (в схемах гомодинного детектирования) использовались точечные детекторы чувствительностью ~100мВ/мВт или более чувствительные планарные детекторы (детекторы Шоттки).

Отметим, что необходимо учитывать особенности конфигурации плазмы в стеллараторах. В отличие от токамака, влияние магнитного поля создает в каждой из этих установок уникальные трехмерные распределения плотности шнура. Для иллюстрации на рисунке представлена трехмерная картина конфигурации катушек магнитного поля, вакуумной камеры и шнура плазмы в стеллараторе TJ-II (рис.1) («наследника» стелларатора TJ-1U).

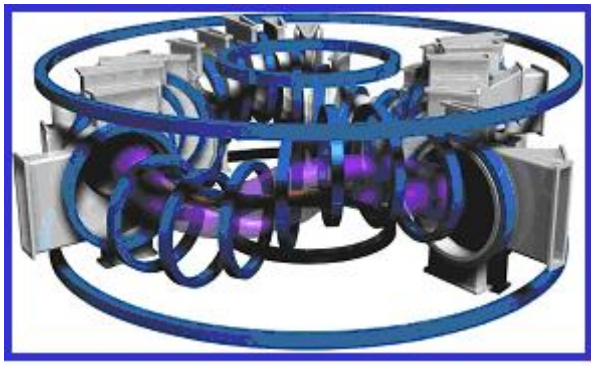


Рис.1 Схема расположения катушек магнитного поля в стеллараторе TJ-II, сиреневым цветом показан плазменный шнур.

Исследование флуктуаций плотности плазмы в Л-2 .

Стелларатор Л-2 - двухзаходный стелларатор, расположен в Институте Общей Физики РАН (Москва). Угол вращательного преобразования определяется магнитными полями, которые в этой установке создаются двумя парами (l = 2) проводников, полное число периодов магнитного поля N=14. В настоящее время установка модернизирована (в статьях называется Л-2М) и продолжает эксплуатироваться (рис 2).

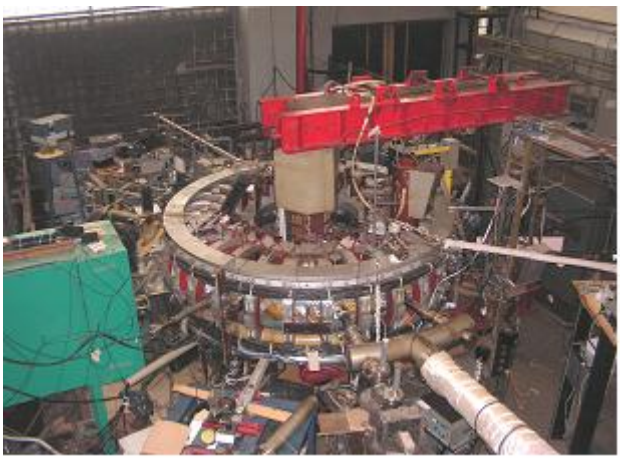


Рис. 2 Общий вид стелларатора Л-2М

Для исследования характеристик флуктуаций плотности в горячих областях плазмы стелларатора Л-2 использовалась методика коллективного рассеяния излучения с длиной волны λ_i = 2,5 мм [9]. При рассеянии на низкочастотных флуктуациях , волновые векторы рассеянной k_s и падающей k_i волн приблизительно равны по абсолютной величине и поэтому значение волнового вектора флуктуаций плотности может быть определено из треугольника волновых векторов. Принимая рассеянное излучение под различными углами по отношению к падающему пучку, можно получить спектр флуктуаций по волновым векторам. На рис.3 представлена геометрия падающего и рассеянных СВЧ-пучков в плоскости малого сечения стелларатора Л-2 .

Ввиду того что диаметры диагностических патрубков камеры стелларатора невелики (70 и 90 мм), оказывается невозможным осуществлять зондирование и прием рассеянного излучения снаружи. Поэтому внутрь вакуумной камеры была помещена приемная рупорно-зеркальная антенная система, принимающая рассеянное в плазме излучение под углами θ_s = 0; 15; 30 и 45 градусов по отношению к падающему СВЧ-пучку. При длине волны зондирующего пучка $\lambda_i \approx$ 2,5 мм такие углы приема соответствуют волновым векторам плазменных колебаний $k_{\square}$ = 6; 13 и 19 см$^{-1}$. Центр области, из которой принимается излучение, фиксирован, а средний радиус магнитной поверхности, на которой расположен центр рассеяния, равен r_s = 7 см.

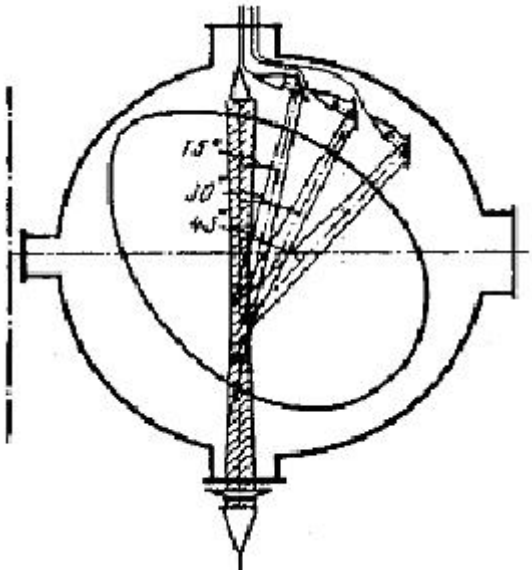


Рис.3 Геометрия рассеяния в малом сечении стелларатора Л-2.

Для детектирования рассеянного излучения использовалась схема гомодинного приема, представленная на рис.4. Часть мощности генератора (ГДИ) с помощью направленного ответвителя (10 дБ) отводится в опорный канал. Основная часть мощности через ферритовый вентиль (ФВ) поступает к передающей антенне. Излучение, рассеянное в плазме, и излучение опорного канала поступают на противоположные плечи двойного волноводного тройника (ДВТ).

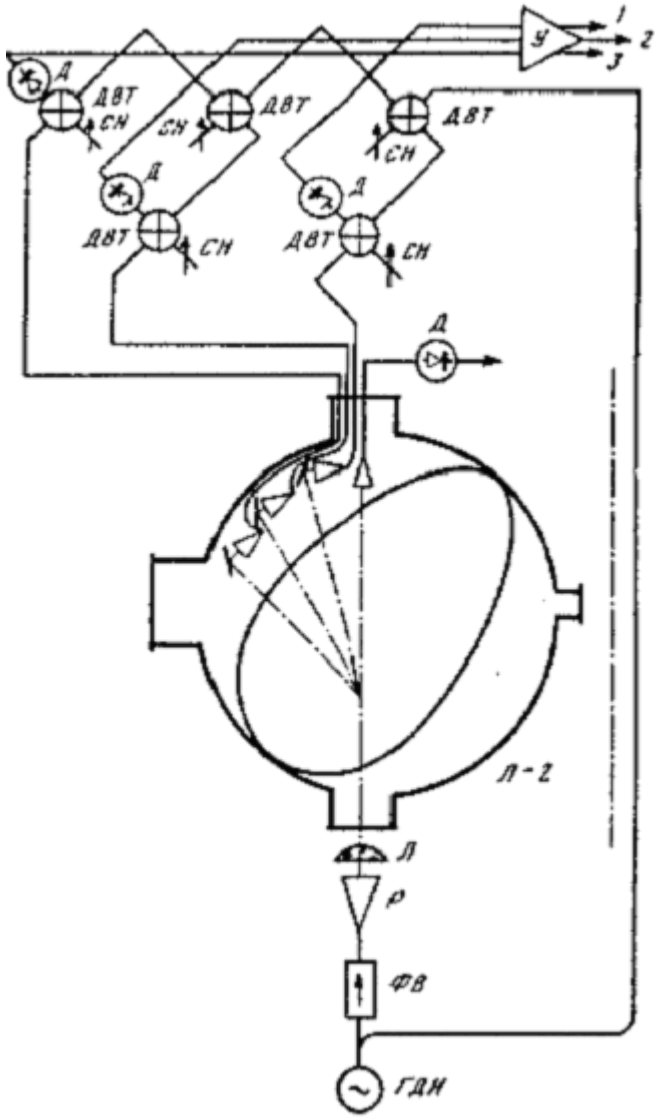


Рис. 4. Схема приема и детектирования рассеянного излучения. ГДИ - генераторная лампа, ФВ - ферритовый вентиль, Р - рупорная антенна, Л - линза, Д - детектор, ДВТ - двойной волноводный тройник, СН - согласованная нагрузка, У - усилитель.

СВЧ-детектор выделяет низкочастотный сигнал биений рассеянного и опорного сигналов, который затем усиливается в полосе частот 2 кГц – 2 МГц н поступает на анализирующую аппаратуру. Используемая схема позволяла одновременно регистрировать сигналы с трех угловых каналов.

Обработка и анализ временных выборок сигналов с детекторов включали в себя следующие операции:

1) оцифровка с интервалом дискретизации $\Delta t = 1$ мкс. Число точек оцифровки $N = 1024/n_i$, где n_t – число временных отрезков, анализирующихся в течение одного разряда установки;

2) вычисление мощности оцифрованного центрированного сигнала;

3) вычисление автокорреляционной функции оцифрованного сигнала и времени автокорреляции. Использование корреляционного метода позволяет увеличить

отношение сигнал/шум в конечном частотном спектре. Преобразование Фурье автокорреляционной функции дает спектр мощности исследуемого сигнала;

4) преобразование Фурье автокорреляционной функции по алгоритму БПФ (быстрое преобразование Фурье);

5) при необходимости проведение статистического усреднения частотных спектров флуктуаций;

6) вычисление спектров по волновым векторам;

7) вычисление относительного уровня флуктуаций плотности.

Стелларатор Л-2 позволял проводить исследования в нескольких плазменных режимах: при создании плазмы продольным током, при дополнительном к току электронно-циклотронном нагреве (ЭЦН) и в режиме только резонансного ЭЦН. Представим некоторые результаты исследований из работ [9,10].

При ЭЦН токовой плазмы частотные спектры флуктуаций плотности мало отличаются от спектров флуктуаций в исходной токовой плазме, так что частотные спектры под воздействием СВЧ-волны накачки практически не изменяются. На рис.5.а представлен спектр флуктуаций плотности при ЭЦН в токовой плазмы, когда центральная электронная температура $T_e(0)$ = 600 эВ, а профиль плотности был близок к квадратичной параболе. Спектры с близкими характерными частотами наблюдались и при ЭЦН бестоковой плазмы обыкновенной волной. В этом режиме, спектр флуктуаций, представленный на рис.5б, также имеет максимальную амплитуду на частотах f = 10 ÷ 20 кГц, но несколько шире, чем при нагреве токовой плазмы. Таким образом, можно сказать, что, как и в режиме омического нагрева при ЭЦН плазмы возбуждаются флуктуации плотности в диапазоне частот до 100 кГц. Подобие спектров в этих режимах нагрева указывает на единую природу этих флуктуаций, связанных, по-видимому, с наличием градиентов плотности и температуры.

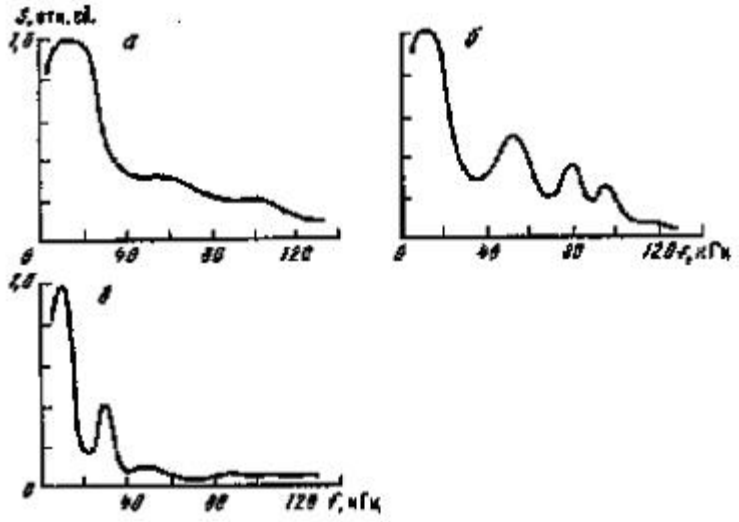


Рис. 5. Частотные спектры флуктуаций при ЭЦН токовой (а) и бестоковой (б,в) плазмы обыкновенной волной.

Спектры по волновым векторам флуктуаций плотности при ЭЦН бестоковой плазмы (рис. 6.), так же как и в режиме омического нагрева, удовлетворительно аппроксимировались гауссовым распределением. В различных режимах нагрева не было обнаружено существенных изменений в спектрах по волновым векторам. На основании измеренных

спектров k рассчитывался уровень флуктуации плотности, из которой принималось рассеянное излучение (r_s = 7 см), незначительно изменялись при сильной перестройке профиля $n_s(r)$,

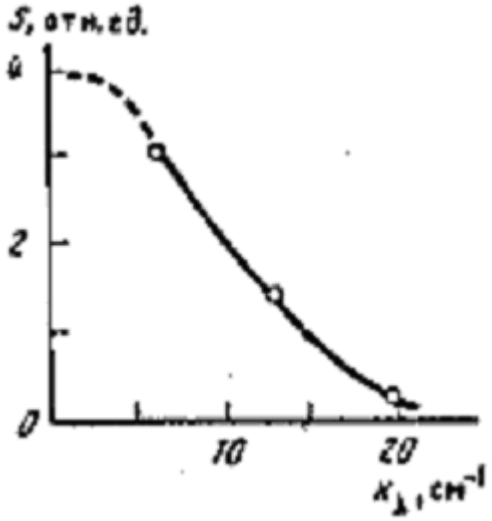


Рис. 6. Спектры флуктуаций плотности при ЭЦН бестоковой плазмы.

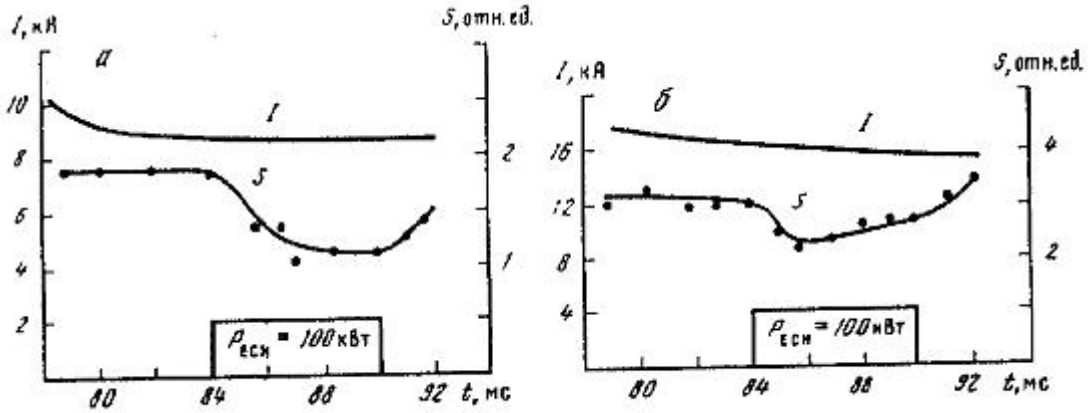


Рис.7. Интенсивность флуктуаций при ЭЦН токовой плазмы обыкновенной волной в двух разрядах плазмы стелларатора Л-2М.

На рис.7 представлен временной ход интенсивности флуктуаций с волновым вектором $k = 6$ см$^{-1}$. На рис. 7.а величина тока в момент включения СВЧ-мощности составляла I_p = 9 кА. После включения мощности нагрева интенсивность флуктуаций уменьшалась и затем оставалась практически постоянной до конца импульса нагрева.

В режиме нагрева, представленном на рис. 7.б, при токе 16 кА интенсивность флуктуаций спадала в течение первых 2 мс ЭЦН, а затем начинала медленно нарастать.

Исследование флуктуаций плотности плазмы в стеллараторе ATF.

В стеллараторе (торсатроне) ATF диагностика 2-мм рассеяния была создана с учетом опыта, полученного в стеллараторе Л-2 [11]. Расположение элементов диагностики 2-мм рассеяния показано на рис.8. Передающая рупорно-линзовая антенна располагалась на внутренней стороне тора, а четыре приемных рупорно-линзовых антенны размещались во внешних патрубках вакуумной камеры.



Рис.8. Расположение элементов диагностики 2-мм рассеяния в ATF.

Конструкция юстировочных устройств передающих и приемных антенн позволяла поворачивать их в одной плоскости в пределах 30 градусов, меняя таким образом расположение областей, из которых производится прием рассеянного излучения, и углов, под которыми наблюдается рассеянный сигнал (т.е. величину волнового числа). Диапазон значений измеряемых волновых чисел простирается от 2 до 20 $см^{-1}$. Схема детектирования была реализована в четырехканальном гомодинном (см. рис.9) и двойном гомодинном варианте (см. ниже).

Основные измерения проводились в экспериментах со скачком плотности (рис.10).

Для определения спектров флуктуаций плотности по волновым числам выбирались такие сочетания углов поворота приемных и передающих антенн, чтобы исследуемые области рассеяния располагались симметрично относительно магнитной оси (см. рис.11).

Спектры по волновым числам, полученные в результате обработки большого числа импульсов, изображены на рис.12.

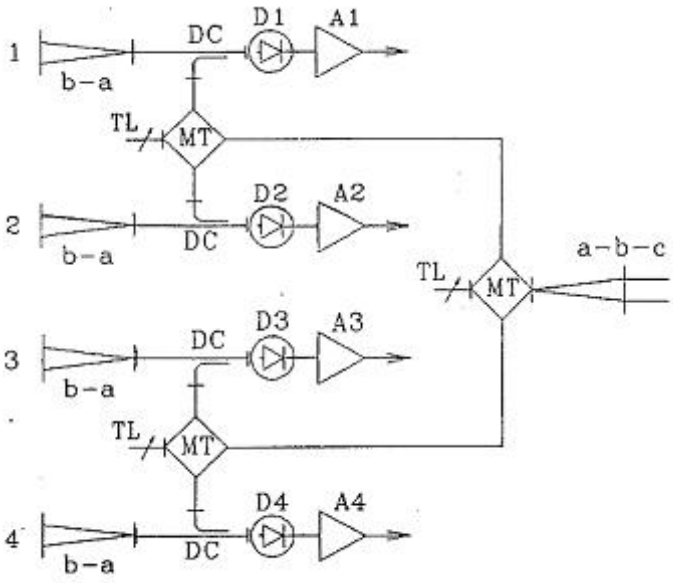


Рис.9. Четырехканальная схема гомодинного детектирования.
MT - двойной волноводный тройник,
a-b-c - волноводные переходники,
TL - согласованная нагрузка,
D1-D4 - детекторные диоды,
A1-A4 - предусилители,
DC - направленный ответвитель (10 дб)

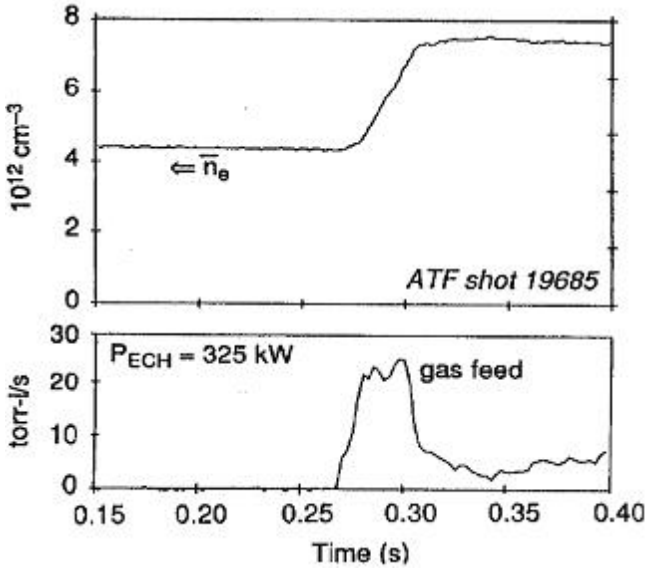


Рис.10. Иллюстрация режима работы ATF со скачком плотности.

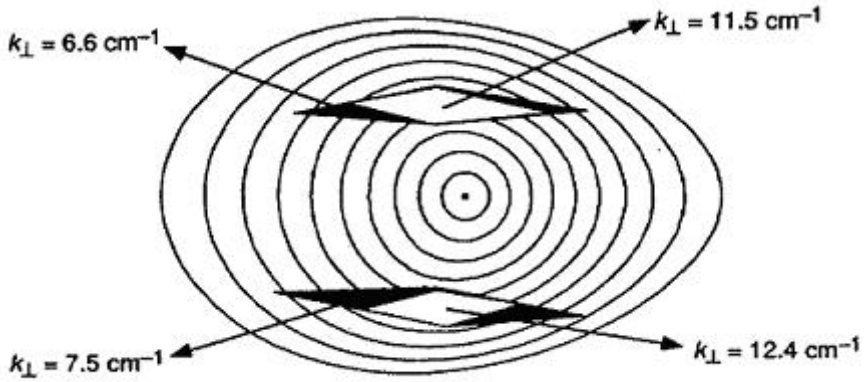


Рис. 11. Расположение исследуемых рассеивающих областей для четырех видов ориентации антенн, использовавшихся для определения спектров по волновым числам.

Заметно, что на спектре, вначале достаточно плоском, затем появляется выраженный пик в тот момент, когда плотность проходит область отрицательного градиента (см. рис.10), и к моменту выравнивания плотности пик также исчезает.

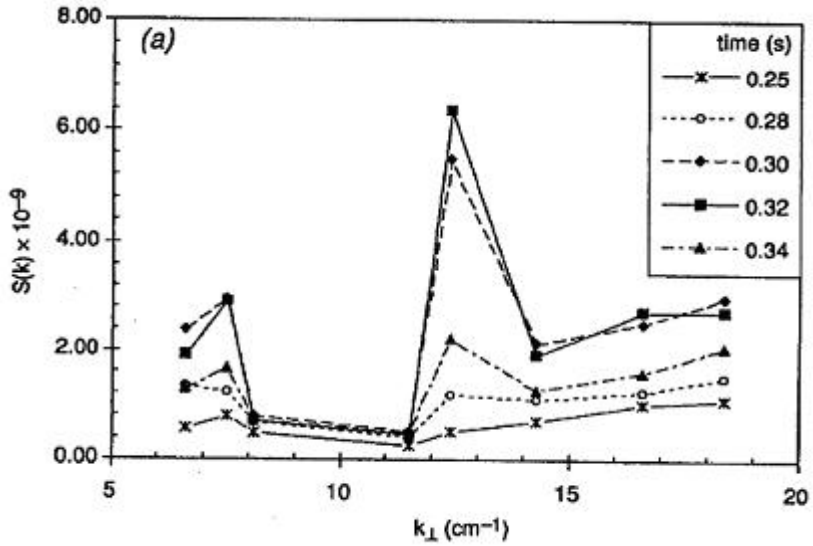


Рис.12. Временная эволюция спектров по волновым числам в режиме со скачком плотности (см. рис. 10.)

Частотные спектры флуктуаций плотности плазмы в области отрицательного градиента плотности изображены на рис.13.

Можно заметить, что в момент выравнивания плотности происходит заметный сдвиг спектра в область более высоких частот.

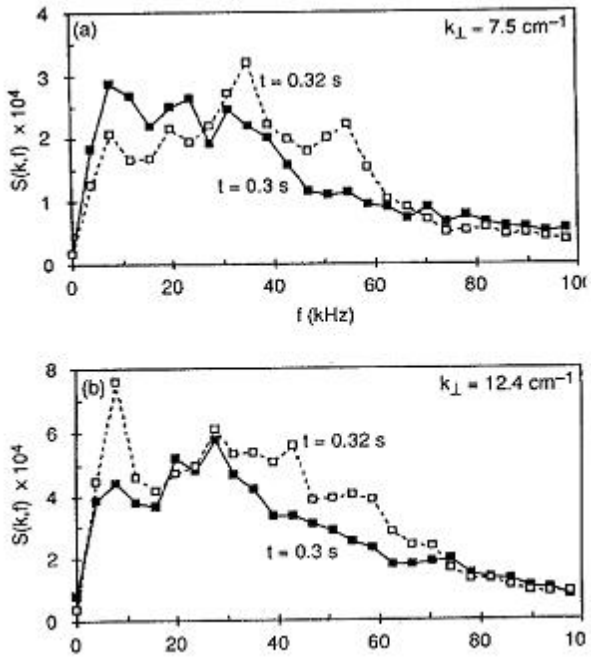


Рис. 13. Частотные спектры флуктуаций плотности плазмы с различными значениями волновых чисел в области отрицательного градиента плотности.

На рис.14 и 15 проиллюстрирована заметная пространственная асимметрия флуктуаций плотности плазмы в режиме со скачком плотности.

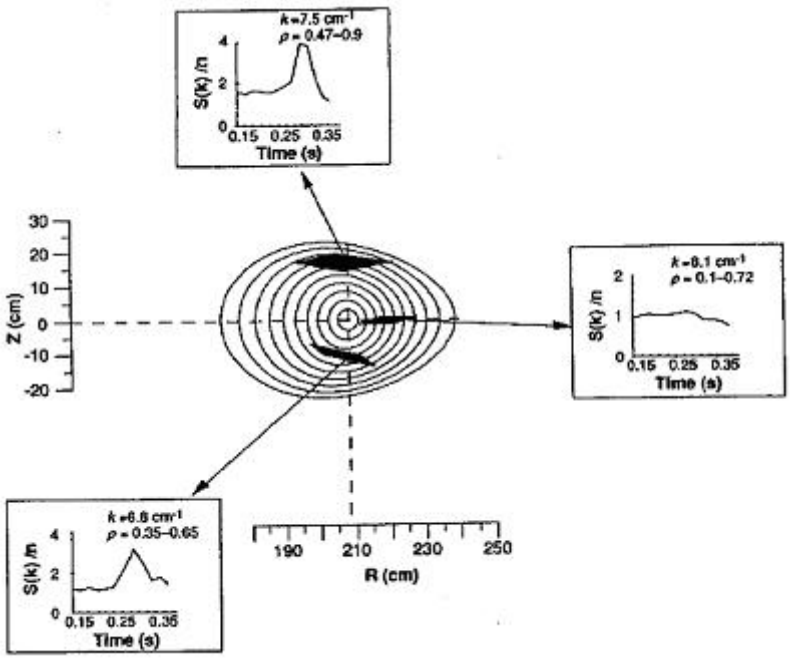


Рис. 14. Пространственная асимметрия флуктуаций плотности плазмы

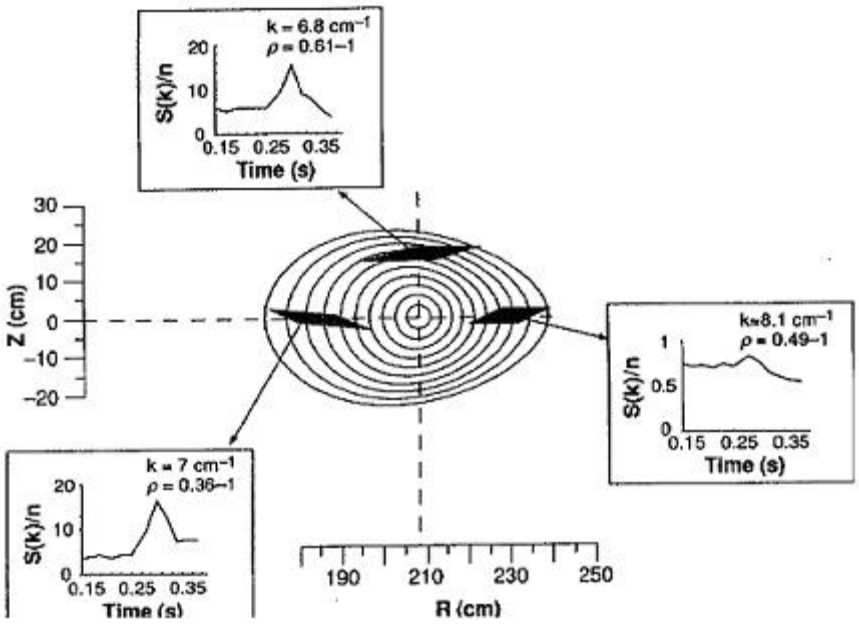


Рис. 15. Пространственная асимметрия флуктуаций плотности плазмы

Исследование флуктуаций плотности плазмы в стеллараторе TJ-1U.

Диагностика 2-мм рассеяния для стелларатора (торсатрона) TJ-1U была спроектирована с учетом опыта, накопленного при создании диагностик для Л-2 и ATF. Для TJ-1U диапазон волновых чисел для флуктуаций плотности составлял от 2 до 20 $см^{-1}$. в соответствии с формулой Брэгга для использовавшейся частоты генератора 141 ГГц и указанного диапазона волновых чисел углы рассеяния принимают значения от 4 до 40 градусов [12].

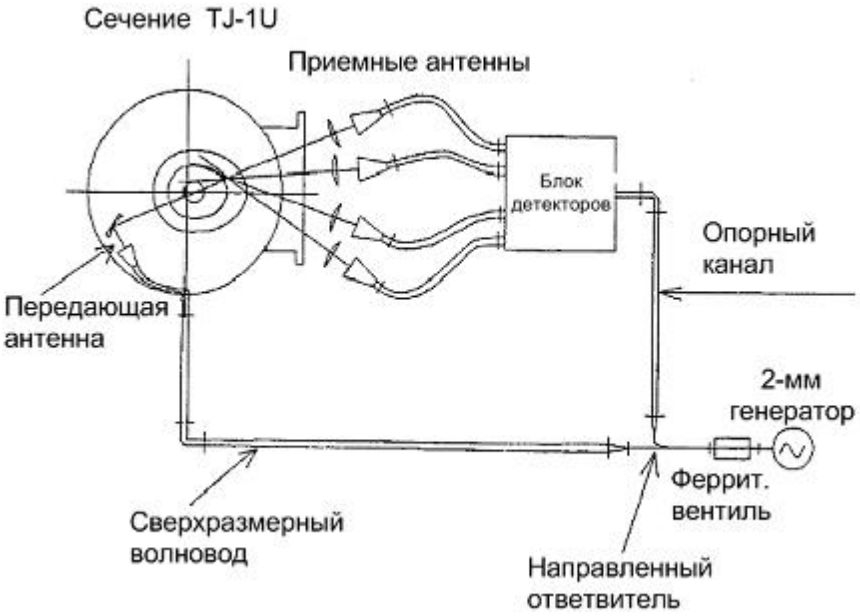


Рис.16. Расположение элементов диагностики 2-мм рассеяния на установке TJ-1U.

На рис.16 показано расположение волноводных и квазиоптических элементов диагностики.

Фиксированная передающая антенна с поворотным зеркалом располагалась внутри вакуумной камеры. Размер пучка в области рассеяния составлял 35 мм. Четыре фиксированных приемных рупорно-линзовых антенны монтировались на внешнем фланце вакуумной камеры. Размер приемных конусов составлял 10 мм, апертурный диаметр - 7 мм. Тефлоновая линза располагалась на расстоянии 180 мм от конуса. В результате диаметр пучка составлял 40 мм на линзе и 30 мм в области рассеяния. Геометрия углов рассеяния приведена на рис. 17.

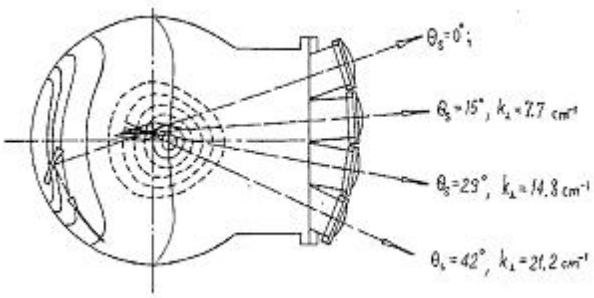


Рис.17.Величины углов рассеяния и соответствующие волновые числа на установке J–1U

Поляризация пучка соответствовала обыкновенной волне. Детекторный узел позволял реализовать схемы четырехканального гомодинного детектирования и двухканального двойного гомодинного детектирования.

Четырехканальная схема гомодинного детектирования практически идентична схеме, употреблявшейся на ATF (см. рис.9)

Схема двухканального двойного гомодинного детектирования [13,14] приведена на рис. 18.

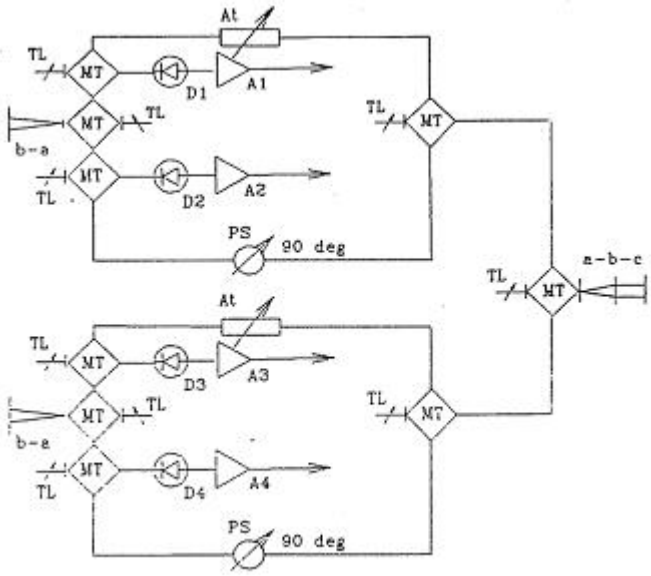


Рис. 18. Двухканальная схема двойного гомодинного детектирования на установке TJ-1U . MT – двойной волноводный тройник , a–b–c– волноводные переходники, TL – согласованная нагрузка, D1–D4– детекторные диоды, A1–A4– предварительные усилители.

В этой схеме опорный сигнал разделяется на две части, каждая из которых, получив фазовый сдвиг 90 градусов, попадает на квадратичные детекторы. Рассеянный сигнал также разделяется на две части и смешивается на тех же детекторах, но без дополнительного фазового сдвига. Такой метод позволяет соединить в себе простоту гомодинного метода с возможностью отстройки от низко- или высокочастотной компоненты, которую дает гетеродинный метод детектирования.

На установке TJ-1U были получены сигналы рассеяния, превышающие уровни шума. Однако физические исследования проведены не были, потому что установка была разобрана, и заменена установкой следующего поколения TJ-II.

Описание стелларатора TJ-II.

Установка создана в 1997 году и находится в Отделе Физики Плазмы института Евроатом-СИЕМАТ. С 1999 года TJ-II работает на физический эксперимент [7]. На рисунке 19. приведена фотография установки (вид сверху).

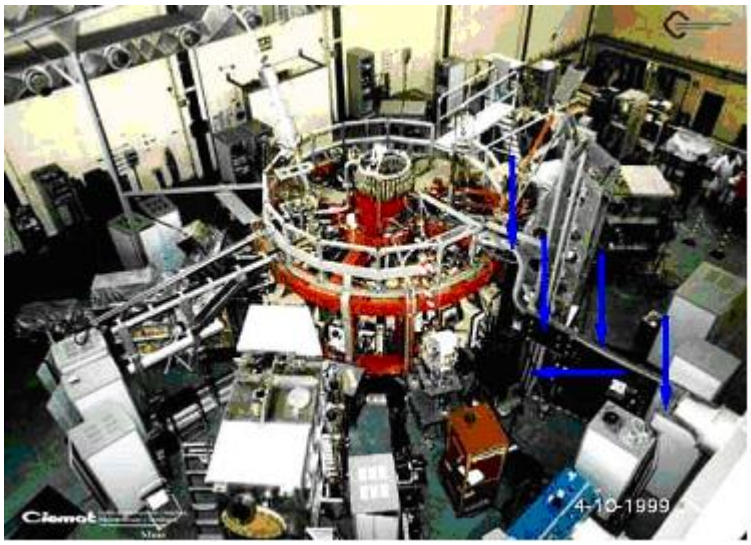


Рис.19. Стелларатор TJ-II. Расположение видимых сверху элементов диагностики 2-мм рассеяния показано синими стрелками

Структура магнитного поля стелларатора TJ-II сложна. Она создается 32 катушками тороидального поля, двумя катушками вертикального поля и центральными проводниками. Изменением тока в разных катушках возможно существенно изменять структуру магнитного поля в стеллараторе. На Рис.1 приведена схема взаимного расположения катушек магнитного поля (темно-синий цвет) и вакуумной камеры (серый цвет) стелларатора TJ-II, внутри камеры сиреневым цветом нарисован плазменный шнур с переменным сечением, характерным для всех установок стеллараторного типа.

Структура магнитного поля этого стелларатора является трехмерной, а сечение и ориентация плазменного шнура сильно изменяется при обходе вдоль тора На рис. 20. показано изменение расположения замкнутых вакуумных магнитных поверхностей и , соответственно, плазменного шнура в разных сечениях стелларатора TJ-II [17].

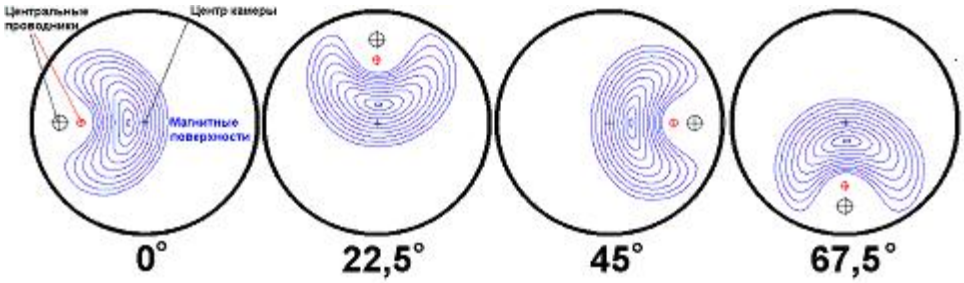


Рис. 20. Изменение расположения магнитных поверхностей TJ-II при обходе вдоль тора.

Значения основных размеров стелларатора TJ-II и параметров плазмы приведены в таблице 2.

Таблица 2. *Параметры плазмы в установке TJ-II.*

Большой радиус R, см	150
Среднее значение малого радиуса a, см	10÷22.
Магнитное поле B, T	<1.2
Вводимая СВЧ мощность P_0, кВт	200÷600
Средняя плотность $\langle n \rangle 10^{13}$, $см^{-3}$	≤1,0
Температура электронов в центре плазменного шнура $T_e(0)$, эВ	500÷800
Относительная величина флуктуаций на краю плазмы $(\delta n/n)_{внеш}$	0,2÷0,25
Длительность стационарной фазы импульса, мс	200÷300

В эксперименте плазма производилась и нагревалась одним или двумя гиротронами с частотой генерации 53.2 ГГц на второй гармонике гирочастоты электронов (длительность импульса до 200 мс, мощность до 400 кВт) [15]. Также в стеллараторе T-II существовала схема дополнительного нагрева плазмы инжекцией нейтрального пучка (мишенная плазма в этом эксперименте также создавалась гиротронами). Профили плотности и температуры электронов обычны для стеллараторов, работающих в бестоковом режиме. Профиль плотности довольно плоский (описывается параболой 6 или даже 8 степени), профиль температуры обостренный. На рис. 21. приведены профили плотности и температуры плазмы в TJ-II, в режиме с одним гиротроном.

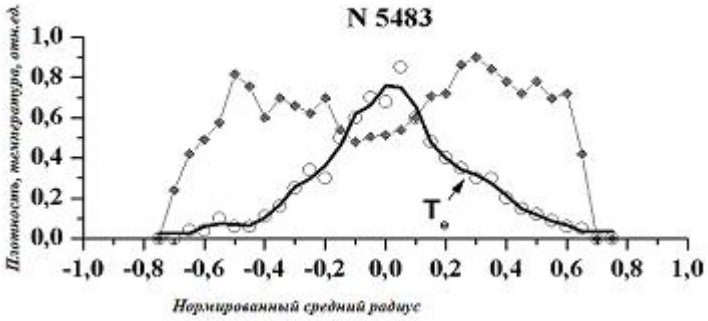


Рис. 21. Пример профилей плотности и температуры в установке TJ-II .

Большое количество диагностик , позволяющих измерять различные характеристики установки и параметры плазмы расположено в разных сечениях установки TJ-II .

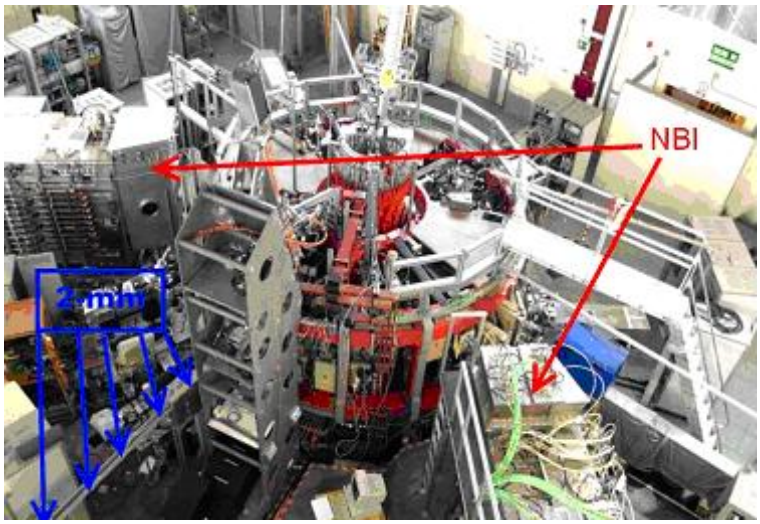


Рис. 22. Взаимное расположение диагностик 2-мм рассеяния и системы инжекции нейтральных пучков (NBI).

Расположение видимых сверху элементов диагностики 2-мм рассеяния показано стрелками на фотографии стелларатора TJ-II (рис. 19, 22).

На установке TJ-II создан современный диагностический комплекс включивший в себя:

Диагностики, предназначенные для измерения макропараметров плазмы:

- ✓ Плотности плазмы – интерферометрия, рефлектометрия, зондирование пучком тяжелых ионов.
- ✓ Температуры электронов плазмы – измерения электронно-циклотронного излучения, томсоновское рассеяние, оптические диагностики, измерение мягкого рентгеновского излучения, зондирование пучком тяжелых ионов.
- ✓ Измерения энергосодержания плазмы – болометр.
- ✓ Контроль положения плазменного шнура – оптические диагностики.
- ✓ Контроль примесей – оптические диагностики.
- ✓ Измерение температуры ионов – корпускулярная диагностика.
- ✓ Измерение температуры, плотности и плазмы в краевых областях – ленгмюровские зонды.
- ✓ Измерение потоков в краевых областях – трехштыревые ленгмюровские зонды.
- ✓ Вспомогательные диагностики, например, СВЧ диагностики для измерения параметров СВЧ излучения гиротронов или для оценки величины поглощенной мощности в плазме.

Диагностики для измерения турбулентных параметров плазмы (в дальнейшем будем называть микропараметрами плазмы):

- ✓ Измерение флуктуаций магнитного поля за пределами плазменного шнура – магнитные зонды.
- ✓ Измерение флуктуаций плотности, потенциала, потока частиц в краевой плазме – ленгмюровские зонды разных конструкций.
- ✓ Измерение флуктуаций плотности плазмы на середине радиуса плазмы – диагностика 2-мм рассеяния.

Таким образом, диагностика 2-мм рассеяния является одной из важных диагностик по исследованию микропараметров плазмы (и единственной, которая работает во внутренней области плазменного шнура). Кроме того, принципиально важным является то, что одновременно с измерением флуктуационных параметров происходило измерение всех макропараметров плазмы. Это позволяло проводить измерения корреляций между макропараметрами и микропараметрами плазмы и получить целый ряд важных физических результатов.

Диагностика 2-мм рассеяния в стеллараторе TJ-II.

Стелларатор TJ-II является сложным тороидальным устройством для создания и удержания высокотемпературной плазмы. Поэтому при расчете и конструировании диагностики микроволнового рассеяния, требовалось удовлетворить некоторым специфическим условиям, которые существенно усложнили создание диагностики. Спецификой дизайна диагностики 2-мм рассеяния в стеллараторе TJ-II являлись следующие требования:

1. все элементы диагностики должны были располагаться вне вакуумного объема,
2. для размещения выделялись верхний и нижний патрубки сечения, представляющие собой сильно вытянутую равнобедренную трапецию с основаниями 40 и 100 мм и высотой 420 мм,
3. пакетированная (закрепленная в магните) генераторная лампа должна была размещаться не ближе 6 метров от центра установки и как можно ближе к экваториальной плоскости,
4. существовали ограничения на линейные размеры передающих и приемных антенн из-за уже размещенных элементов других диагностик вблизи выделенного сечения.

Размеры портов установки и физическая задача в сочетании с требованиями достаточной простоты реализации привели к тому, что диагностика была спроектирована с двумя передающими (в конечном итоге задействовалась только одна их них) и тремя приемными рупорно-линзовыми антеннами, имеющими возможность поворачиваться в одной плоскости в пределах 40 градусов.

Сечение D1 установки, в котором располагается диагностика (реализованный вариант), исследуемые области плазмы, геометрия и углы рассеяния изображены на рисунке23.

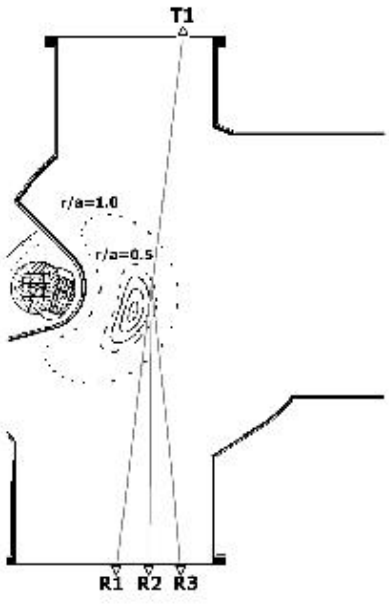


Рис. 23. Сечение установки в месте расположения диагностики, форма плазменного шнура (пунктиром показана крайняя замкнутая магнитная поверхность) и геометрия рассеяния. T1-передающая антенна, R1 - прямой (интерферометрический) канал приема , R2 – канал с углом рассеяния 6º (k=3 см$^{-1}$), R3- канал с углом рассеяния 12º (k=6 см$^{-1}$).

Из рисунка 23. видно, что данная геометрия диагностики в принципе позволяет получить достаточно подробный спектр по волновым числам за счет легкого перестраивания для изучения как внутренней (при задействовании второй передающей антенны), так и внешней области. Для длины волны зондирующего излучения 2 мм рассчитанный диапазон углов рассеяния составляет от 5 до 40 градусов.

Для основного режима работы диагностики были выбраны два значения углов рассеяния в 6º и 12º, что соответствовало волновым числам 3 и 6 $см^{-1}$ соответственно.

Выражение для оценки чувствительности метода принимает вид

$$\left(\frac{\partial n}{n}\right)^2 = \frac{< U_S^2 >}{U_T U_{ref}} \cdot \mathrm{K_g} \cdot \frac{D^2 \cdot \sin\Theta}{w^3 \cdot r_e^2 \cdot n_e^2}$$

Для диагностики 2-мм рассеяния на TJ-II были проведены оценки потерь сигнала (в дб) по элементам приемного и передающего трактов (K_g).

Таблица 3. Оценка потерь сигнала (в дб) по элементам тракта

Элементы канала передачи		**Элементы канала приема**		**Общие элементы**	
Ферритовый вентиль	3	антенна	3	Диаграммы направленности антенн	10
Квазиоптический ответвитель	1	волноводы	3		
Квазиоптический разделитель	3	Квазиоптический ответвитель	1		
волноводы	3	волноводный переход	1		
антенна	3				
В сумме	13		8		10
ИТОГО			**31 дб**		

При мощности генератора, равной 0,1Вт, уровне опорного сигнала -20дб, чувствительности приемника в полосе 1 МГц , равной 10^{-5}В и чувствительности детектора, равной 100В/Вт, получаем для D=80 см , w = 2 см и плотности плазмы на середине радиуса $n_e \approx 10^{13}$ $см^{-3}$ теоретическую оценку чувствительности диагностики, равную $\left(\frac{\partial n}{n}\right)^2 = \mathbf{10^{-6}}$

Теоретическая оценка показывает достаточно высокую чувствительность данной диагностики 2-мм рассеяния. Дальнейшие эксперименты показали соответствие данной оценки реальным сигналам, полученным при работе установки TJ-II за последнее время [16].

.

Заключение.

В настоящем обзоре обоснована необходимость исследования флуктуаций плотности плазмы в стеллараторах диагностикой 2-мм рассеяния. Представлена технология создания диагностики 2-мм рассеяния. Приведены примеры создания и успешной работы такой диагностики на стеллараторах Л-2 (Москва), ATF (США), TJ-1U (Испания) TJ-II (Испания). Неоднократная реализация на различных установках и большое количество интересных физических результатов подтверждает перспективность и эффективность использования диагностики 2-мм рассеяния для изучения флуктуаций плотности плазмы в тороидальных

термоядерных установках. Проведенные исследования флуктуаций показали высокий уровень низкочастотных плазменных шумов – от нескольких процентов в стеллараторе ATF до нескольких десятков процентов в стеллараторе Л-2М. В исследованиях, реализованных на вышеуказанных установках были также определены некоторые типы неустойчивостей, ответственных за развитие турбулентных пульсаций в стеллараторах – дрейфово-диссипативные и неустойчивости на запертых электронах.

Литература

1. J.W. Connor, P. Burraffi, J.G. Cordey et al. EU-US workshop on transport in fusion plasmas. // Plasma Phys. Contr. Fusion. 1999. 41. P. 693-707.

2. Г.М. Батанов, А.Е. Петров, А.А. Пшеничников, К.А. Саркисян, и др. «Аномальная неброуновская диффузия в структурной плазменной турбулентности». В сб. *Стохастические модели структурной плазменной турбулентности*. В. Ю. Королев и Н. Н. Скворцова – ред. “МАКС-Пресс". М. 2003. С. 151-185.

3 V.V.Abrakov, D.K.Akulina, E.D.Andryukhina G.M. Batanov, M.S. Berezhetskij, I.S. Danilkin, N.P. Donskaya, O.I. Fedyanin, G.A. Gladkov, S.E. Grebenshchikov, J.H. Harris, N.K. Kharchev, Yu.V. Kholnov, L.V. Kolik, L.M. Kovrizhnykh, N.F. Larionova, A.A. Letunov, K.M. Likin, J.F. Lyon, A.I. Meshcheryakov, Yu.I. Nechaev, A.E. Petrov, K.A. Sarksyan and I.S. Sbitnikova. High power density electron cyclotron experiments in the L-2M stellarator. // Nuclear Fusion. 1997. 37. P. 233-242.

4 N.K. Kharchev, G. M. Batanov, L. V. Kolik, A.E. Petrov, K.A. Sarksyan, N. N. Skvortsova. «Observation of the Coherence between the Plasma Density Fluctuations in the Core and at the Edge of the Plasma Column in the L–2M Stellarator» // J. of Mathematical Sciences. 2002. 112. P. 3846–3850.

5 M.G. Shats, J.H. Harris, K.M. Likin, J.B. Wilgen, L.R. Baylor, J.B. bell. C.H. Ma, M. Murakami, K.A. Sarksian, S. C. Aqceto, T. S. Bigelow, G. L/. Bell, R.J. Colchin, R.A. Dory, J.L. Dunlap, G.R. dyar, A.C. England, R.C. Goldfinger, G.R. hanson, D.P. Hutchinson, R.C. Isler, T.C. jemigan, R.A. Langley, D.C. Lee, J.F. Lyon, A.L. Quella, D.A. Rasmussen, R.K. Richards, M.J. Saltmarsh, J.E. Simkins, K.L. Vander Sluis, J.J. Zeilinskii. Drift-wave-like density fluctuations in the Advanced Toroidal Facility (ATF) torsatron. // Phys. Plasmas. 1995, v.2. P.398-413.

6 C. Hidalgo, B.Ph. van Milligen, M.A. Pedrosa, E. Sanchez, et al. On the radial structure of fluctuations and turbulence induced flows. // J. of Plasma Fusion and Research (JPFR Series). 1998. 1. P. 96-98.

7 J. Alonco, I. Almoguera, E. Ascasíbar, A. Baciero, R. Balbín, M. Blaumoser, J. Botija, B. Brañas, E. de la Cal, A. Cappa, R. Carrasco, F. Castejón, J. R. Cepero, C. Cremy, J. M. Delgado, J. Doncel, C. Dulya, T. Estrada, A. Fernández, C. Fuentes, A. García, I. Garcí a-Cortés, J. Guasp, J. Herranz, C. Hidalgo, J. A. Jiménez, I. Kirpitchev, V. Krivenski, I. Labrador, F. Lapayese, K. Likin, M. Linier, A. López-Fraguas, A. López-Sánchez, E. de la Luna, R. Martín, A. Martinez, L. Martínez-Laso, M. Medrano, P. Méndez, K. J. McCarthy, F. Medina, B. van Milligen, M. Ochando, L. Pacios, I. Pastor, M. A. Pedrosa, A. de la Peña, A. Portas, J. Qin, L. Rodríguez-Rodrigo, A. Salas, E. Sánchez, J. Sánchez , F. Tabarés, D. Tafalla,

V. Tribaldos, J. Vega, B. Zurro, D. Akulina, O. I. Fedyanin, S. Grebenshchikov, N. Kharchev, A. Meshcheryakov, K. A. Sarksian, R. Barth, G. van Dijk, H. van der Meiden. Confimenent studies in the TJ-II stellarator. // Plasma Phys. Control Fusion. 1999. 41. P.B109 –B117. (http://www.ciemat.es/eng/instalacion/tj-II.html)

8 Генератор дифракционного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / И.М. Балаклицкий, Б.К. Скрынник, О.А. Третьяков и др. // Украинский Физический Журнал, 1969, т.14, №4, с.539-552

9 Г.М. Батанов, К.М. Ликин, К А Саркисян, М.Г. Шац. К вопросу о дрейфовой турбулентности бестоковой плазмы в стеллараторе Л-2 при ее электронном циклотронном нагреве. // Физика Плазмы. 1993. 19. С. 1199-1209.

10 G.M. Batanov, K.A. Sarksian, A.V. Sapojnikhov, N.N. Skvortsova, M.G. Shats. Spectra and correlation functions of drift and ion-sound turbulence. IV Inter. Conf. on Nonlinear and Turbulent Processes in Physics. Kiev. 1989. 1. P.231-234.

11 M.G. Shats, J.H. Harris, K.M. Likin, J.B. Wilgen, L.R. Baylor, J.B. bell. C.H. Ma, M. Murakami, K.A. Sarksian, S. C. Aqceto, T. S. Bigelow, G. L/. Bell, R.J. Colchin, R.A. Dory, J.L. Dunlap, G.R. dyar, A.C. England, R.C. Goldfinger, G.R. hanson, D.P. Hutchinson, R.C. Isler, T.C. jemigan, R.A. Langley, D.C. Lee, J.F. Lyon, A.L. Quella, D.A. Rasmussen, R.K. Richards, M.J. Saltmarsh, J.E. Simkins, K.L. Vander Sluis, J.J. Zeilinskii. Drift-wave-like density fluctuations in the Advanced Toroidal Facility (ATF) torsatron. // Phys. Plasmas. 1995, v.2. P.398-413.

12 K.M. Likin, J. Sanchez, B. Branas, K.A. Sarksian. Measurements of density fluctuations by 2-mm scattering diagnostic in TJ-1U torsatron. // X Inter. Workshop. on Stellarators (Madrid), 1995, P.216.

13 N.K. Kharchev, G. M. Batanov, L. V. Kolik, A.E. Petrov, K.A. Sarksyan, N. N. Skvortsova. «Observation of the Coherence between the Plasma Density Fluctuations in the Core and at the Edge of the Plasma Column in the L–2M Stellarator» // J. of Mathematical Sciences. 2002. 112. P. 3846–3850.

14 Г.М. Батанов, В.Е. Бенинг, В.Ю. Королев, А.Е. Петров, А.А. Пшеничников, К.А. Саркисян, Н.Н. Скворцова, Н.К. Харчев, Ю.В. Хольнов. Структурная плазменная низкочастотная турбулентность в стеллараторе Л-2М.//Письма в ЖЭТФ, 2003. 78. С. 974-983.

15 J. A. Jimenez, E. de la Luna, I. Garcia-Cortes, F. L. Tabares, B. Branas, F. Castejon, D. Tafalla, F. Medina, M. Ochando, B. Zurro, J. Romero, E. Ascasibar and TJ-II Team. Influence of resonances on ELM-like events at TJ-II. Proc. 13th Stell. Workshop, Canberra 2002, P2.A8.

16 N.N. Skvortsova, G. M. Batanov, L. V. Kolik, A. E. Petrov, A.Pshenichnikov, K. A. Sarksyan, N.K.Kharchev, Yu.V.Khol'nov, S.Kubo, J.Sanchez.. Recent results of studies of fluctuations in high-temperature plasma of modern stellarators by microwave scattering technique. Strong Microwaves in Plasmas. Ed. A G. Litvak. Nizny Novgorod, 2006. P. 581-586

17 A. Lopez-Fraguas, E. Ascasibar, J. A. Romero, I. Garcia-Cortes,J. A. Jimenez, A. Lopez Sanchez,J. Qin1, M. Otte and TJ-II Team. Magnetic Surface Mapping in TJ-II Heliac. Proc. 13th Stell. Workshop, Canberra 2002. Paper PI:6.

Поступила: 24.02.10.