

УДК 533.9.082

КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТРТ

© 2024 г. А.Ю. Яшин^{a,b,*}, А.М. Пономаренко^a, В.В. Солоха^{a,b}, С.С. Рожков^c, А.А. Харчевский^d^a Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия^b Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия^c НИИ «Вектор», Санкт-Петербург, Россия^d Московский институт радиотехники, электроники, автоматики (МИРЭА) -
Российский технологический университет, Москва, Россия

*e-mail: alex_yashin@list.ru

Поступила в редакцию 21.12.2023г.

После доработки 01.02.2024г.

Принята к публикации 15.02.2024г.

Обсуждается возможность применения диагностики доплеровского обратного рассеяния (ДОР) для решения задач токамака с реакторными технологиями (ТРТ), а также предложены способы ее реализации в ТРТ, включая обсуждение возможных технических характеристик системы. Одним из наиболее важных преимуществ реализации ДОР является возможность исследовать различные области плазмы. Это требует выбора соответствующего диапазона частот зондирования, чтобы они соответствовали сценариям и профилям плотности, ожидаемым в ТРТ. Обсуждаются аспекты и преимущества различных способов реализации ДОР на токамаке. Представлены возможные аппаратные средства, конструкции и расположение антенной системы. Существуют также ограничения системы, которые необходимо учитывать специально для ТРТ. Идеи по реализации ДОР на ТРТ подкреплены расчетами трассировки лучей и разрешения диагностики. Также оцениваются волновые числа флуктуаций плазмы, которые система могла бы регистрировать.

Ключевые слова: диагностика плазмы, термоядерный реактор, токамак с реакторными технологиями, ТРТ, доплеровское обратное рассеяние, доплеровская рефлектометрия

DOI: 10.31857/S0367292124040072, **EDN:** QDGVBM

1. ВВЕДЕНИЕ

Осуществление управляемого термоядерного синтеза (УТС) является одной из главных задач, стоящих перед человечеством, которая принесет огромные социальные выгоды в случае успеха. В настоящее время научное сообщество делает все возможное для решения оставшихся проблем на пути к достижению УТС. Мировые исследования в области термоядерного синтеза в конечном итоге направлены на создание демонстрационной термоядерной электростанции DEMO, которая сыграет значимую роль в энергоснабжении в конце этого столетия. Исследования термоядерного синтеза представляют собой сочетание разработки научной основы удержания плазмы, развития связанных с термоядерным синтезом технологий и комплексной демонстрации производства термоядерной энергии. Продолжающееся взаимодействие между этими тремя областями исследований имеет основополагающее значение для успеха исследований в области термоядерного синтеза [1]. Исследования в конечном итоге направлены на строительство и успешную демонстрацию

токамака-реактора [2]. По пути к созданию такого реактора необходимо создание ряда токамаков с использованием новых технологий, уточняющих отдельные аспекты работы реактора. Один из таких проектов — это токамак с реакторными технологиями (ТРТ).

Токамак с реакторными технологиями (ТРТ) это разрабатываемый компактный стационарный токамак с высоким магнитным полем и с дейтериевой термоядерной плазмой [3]. Успех будущих термоядерных экспериментов напрямую зависит от возможностей разработанных диагностических систем, поэтому одной из миссий ТРТ является разработка совместимых с термоядерным реактором диагностик. Данная задача напрямую связана с запланированным проведением исследований квазистационарных плазменных разрядов в различных режимах с плотностью и температурой, соответствующих реакторным [4].

В данной статье обсуждается возможность использования диагностики доплеровского обратного рассеяния (ДОР) на токамаке ТРТ с целью исследования различных свойств турбулентности плаз-

мы. Диагностика ДОР стала неотъемлемой частью исследований плазмы на большинстве токамаков [5–16] и стеллараторов [17–21] по всему миру, а также проектируется для новых установок, таких как JT60-SA [22] и ITER [23]. Большая информативность данной диагностики позволит решать многие задачи, определенные миссией ТРТ.

Статья устроена следующим образом: в разд. 2 описан физический принцип диагностики ДОР. В разделе 3 обсуждаются задачи, определенные миссией ТРТ, решению которых будет способствовать диагностика ДОР. В разд. 4 представлены результаты анализа распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона в ТРТ. Далее в разд. 5 приводится расчет разрешения ДОР на ТРТ, а также оценка оптимального размера антенны. В разд. 6 описан возможный дизайн ДОР на ТРТ, а в разд. 7 установка и концепция ДОР на ТРТ. В заключении делаются основные выводы из проведенного в статье анализа и рассматриваются возможные варианты развития системы ДОР и методов обработки экспериментальных данных.

2. ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП МЕТОДА ДОППЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Метод доплеровского обратного рассеяния (ДОР), или доплеровской рефлектометрии (ДР), основан на анализе рассеянного на колебаниях плотности плазмы электромагнитного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Физический принцип метода ДОР основан на явлении коллективного рассеяния электромагнитного излучения на движущихся неоднородностях плотности плазмы [24]. Зондирующая волна направляется в плазму под углом θ к поверхности, а обратное рассеяние происходит преимущественно вблизи области отсечки зондирующего излучения, что обеспечивает локальность измерений методом ДОР. Угол наклона θ выбирается таким образом, что волновой вектор зондирующего излучения в области отсечки $k_{\parallel}$ направлен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Согласно условию Брэгга, обратное рассеяние происходит на флуктуациях плотности с волновым вектором $k = \pm 2k_{\parallel}$.

При рассеянии на движущихся со скоростью v неоднородностях плотности плазмы происходит доплеровский сдвиг частоты рассеянного излучения на величину $\Delta\omega = \vec{v} \cdot \vec{k} = v_{\parallel}k_{\parallel} + v_{\perp}k_{\perp} + v_r k_r$, где $v_{\parallel}$ и $k_{\parallel}$ направлены вдоль линий магнитного поля, $v_{\perp}$ и $k_{\perp}$ направлены перпендикулярно одновременно магнитному полю и радиальному электрическому полю, а v_r и k_r направлены вдоль малого радиуса токамака. В установках магнитного удержания флук-

туации плотности плазмы вытянуты вдоль силовых линий, что приводит к тому, что $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$, что позволяет пренебречь параллельной компонентой в выражении. Кроме того, радиальная компонента тоже вносит незначительный вклад, так как обычно $k_r \approx 0$. Это означает, что результирующий доплеровский сдвиг обусловлен только перпендикулярной составляющей. Поэтому измерив величину и знак доплеровского сдвига рассеянного излучения, можно определить величину и направление скорости флуктуаций плотности плазмы с волновым вектором $k_{\perp}$ в направлении диамагнитного дрейфа заряженных частиц (электронов или ионов), перпендикулярном магнитному полю, по формуле $V_{\perp} = \frac{\Delta\omega}{k_{\perp}}$. Скорость,

извлеченная из доплеровского сдвига, может содержать две компоненты $v_{\perp} = v_{E \times B} + v_{phase}$ где $v_{E \times B}$ — скорость $E \times B$ дрейфа в радиальном электрическом поле, v_{phase} — фазовая скорость флуктуаций плотности. Каждая компонента позволяет получать различную информацию о плазменной турбулентности, например, данные о v_{phase} и ее направлении дают информацию о типе присутствующей турбулентности и ее поведении, а знание $v_{E \times B}$ позволяет рассчитывать значения радиального электрического поля, поэтому, чтобы верно интерпретировать данные ДОР, необходимо дополнительно проводить моделирование для условий, в которых будут проводиться анализируемые эксперименты.

Метод ДОР позволяет использовать излучение СВЧ-диапазона с поляризацией О- или Х-типа. Мощность рассеянного излучения в случае падающего излучения О-моды пропорциональна в борновском приближении интенсивности рассеивающих флуктуаций плотности, что позволяет измерять амплитуду мелкомасштабных турбулентных колебаний плазмы выделенного масштаба $k_{\perp}$.

Таким образом, экспериментальные результаты, характеризующие турбулентность плазмы в токамаке, которые могут быть получены методом ДОР:

- при одновременном зондировании плазмы несколькими близкими по частоте СВЧ- волнами (многочастотный метод ДОР) можно измерять радиальные профили амплитуды флуктуаций плотности. С помощью корреляционного анализа сигналов, рассеянных в близко расположенных радиальных областях, можно измерить характерный радиальный размер турбулентных структур выделенного масштаба $k_{\perp}$ и угол их наклона относительно радиального направления, определяющий связь турбулентности с радиальной неоднородностью скорости $E \times B$ дрейфа [25,26];

- изменяя угол наклона зондирующего пучка θ можно измерять спектры флуктуаций плотности

плазмы по волновым числам $k_{\perp}$. Это позволит идентифицировать различные типы плазменных неустойчивостей. Например, типичные интересующие значения находятся в диапазоне $k_{\perp}\rho_i \simeq 0.3 - 5$, где ρ_i — ионный Ларморовский радиус, что подходит для наблюдения неустойчивостей ITG- и TEM-типа;

- диагностика позволяет измерять радиальные профили перпендикулярной (полоидальной) скорости флуктуаций плотности плазмы. В случае, когда $V_{\perp}$ определяется $E \times B$ дрейфом плазмы, измерение $V_{\perp}$ позволяет рассчитать профиль радиального электрического поля и его градиент [17];

- результаты измерений ДОР хорошо подходят для сравнения с результатами гирокинетического (ГК) моделирования турбулентности, в том числе путем подстановки выходных данных ГК модели турбулентности в полноволновой код и прямого сравнения экспериментальных результатов и результатов синтетической диагностики [15].

Описанные физические принципы метода ДОР свидетельствуют о том, что диагностика является подходящим инструментом для исследования турбулентности плазмы в токамаке ТРТ. В отличие от обычной рефлектометрии, доплеровская рефлектометрия позволяет исследовать более широкий круг параметров турбулентности. Вместе с тем метод доплеровской рефлектометрии обладает всеми преимуществами обычной рефлектометрии: нежесткими требованиями к размещению диагностики на токамаке, недорогой микроволновой техникой, высоким пространственным и временным разрешением. Результаты измерений имеют относительно простую интерпретацию. ДОР обладает хорошим пространственным, спектральным и временным разрешением параметров турбулентности [27]. Типичные значения для первых двух характеристик составляют $\Delta r \simeq 1 \text{ cm}$ и $\Delta k_{\perp} \simeq 1 \text{ cm}^{-1}$. Временное разрешение измерения параметров ограничивается только интервалом дискретизации данных (обычно разрешения выше мегагерца, достаточного для изучения турбулентных явлений). Типичный радиальный диапазон измерений охватывает обдирочный слой плазмы (SOL), область транспортного барьера и центральные области плазмы и определяется профилем плотности плазмы, частотой и поляризацией зондирующего излучения (конкретные значения для исследуемых областей и оценки разрешающей способности диагностики для сценариев ТРТ обсуждаются ниже);

3. КАКИЕ ЗАДАЧИ РЕШИТ ДОР НА ТРТ

На всех этапах исследования чрезвычайно важной является информация о турбулентном состоянии плазмы, во многом определяющем перенос,

а также о различных развивающихся резонансных неустойчивостях. Диагностика ДОР является одной из наиболее информативных диагностик флуктуаций плотности плазмы и позволяет решать одновременно множество задач [28]. Например, применение ДОР на токамаке Глобус-М/М2 позволило исследовать процесс перехода в режим улучшенного удержания [29], возникающие во время такого перехода колебания предельного цикла [30, 31], возникающие во время Н-режима периферийные локализованные моды [32], процесс перехода из Н-моды с ELM в ELM-free Н-моду [33], возникающие во время Н-моды с ELM филаменты [34, 35], а также различные плазменные колебательные процессы, такие как тиринг моды [36] и их влияние на развитие филаментов [37], геодезические акустические моды [38], квази-когерентные моды [39], тороидальные альфвеновские моды [40, 41] и альфвеновские каскады [42].

3.1. Исследование вращения плазмы при различных методах нагрева

В токамаке ТРТ планируется проводить эксперименты с различными видами дополнительного нагрева, например, эксперименты по поддержанию неиндукционного тока инъекцией быстрых частиц и нагрев плазмы электронным циклотронным нагревом (ЭЦН) [43, 44]. Так как различные типы нагрева по-разному влияют на скорость плазменного вращения, важно иметь возможность измерять вращение плазмы во время различных сценариев разряда. Многочастотная диагностика ДОР дает возможность получать профили полоидальной скорости вращения, а также исследовать реакцию плазменной турбулентности на различные методы дополнительного нагрева. Зондирование плазмы на нескольких частотах позволяет измерять перпендикулярную скорость плазмы в различных радиальных областях разряда, таких как обдирочный слой (SOL), сепаратриса, пьедестал и центральные области. Получаемые экспериментальным путем результаты можно сопоставлять с транспортным моделированием. Измерение вращения плазмы методом ДОР позволит провести детальное исследование эффективности передачи момента силы плазме от внешних источников и механизмов нарушения изотропии [22].

3.2. Исследование режима улучшенного удержания

Все режимы работы токамака стремятся к получению плазмы с большим временем удержания частиц и энергии, т. е. работу в стационарном Н-режиме. В связи с этим важной является задача изучения процессов ЛН-перехода и механизмов, определяющих потоки тепла и частиц в близких к реакторным условиям. Диагностика ДОР позволяет получать различные характеристики таких явлений, как зональные

потоки, например, геодезические-акустические моды (ГАМ) [45], и колебания предельного цикла (ЛСО) [46]. Переход в режим с улучшенным удержанием происходит в результате образования транспортного барьера в плазме. Процесс перехода также сопровождается изменением турбулентного состояния плазмы. Детальное исследование турбулентности в области транспортного барьера может быть выполнено с помощью многочастотной схемы ДОР [47]. Результаты измерений включают в себя радиальные распределения мощности колебаний плотности плазмы и их спектров, спектры по волновым числам $k_{\perp}$, структуру мелкомасштабной турбулентности в полоидальном сечении, радиальное распределение скорости плазмы и ее спектра. Полученные результаты также хорошо согласуются с ГК кодами [48].

Измерения перпендикулярной скорости вращения плазмы методом ДОР может использоваться для оценки профилей радиального электрического поля E_r и его ширины. Эти данные важны для сопоставления с результатами транспортного моделирования, поскольку радиальные электрические поля оказывают стабилизирующее влияние на плазму. Это влияние связано с декорреляцией турбулентных структур широм $E \times B$ -скорости [49, 50].

Также, переход в Н-режим обычно сопровождается явлением краевых плазменных неустойчивостей (ELM), которые определяют динамику транспортного барьера и тепловую нагрузку на конструктивные элементы токамака [51]. Экспериментальное исследование турбулентности в условиях существования ELM возможно проводить с помощью диагностики ДОР [52].

Во время ELM также нередко наблюдается появление вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля нитевидных структур (филаментов), которые рассматриваются как нелинейная стадия развития пилинг-баллонной неустойчивости [53]. Исследование таких структур с помощью многоканальной ДОР позволяет определить их локализацию, оценить их поперечные размеры, модовые числа и измерить скорость их движения [54]. Результаты измерения периферийной турбулентности могут сравниваться с результатами моделирования развития пилинг-баллонных мод на ТРТ [55, 56].

Кроме того, с помощью ДОР можно анализировать электрические поля вблизи сепаратрисы со стороны слабого магнитного поля в режимах детачмента [57]. Согласно теоретическому предсказанию, скорость $E \times B$ -дрейфа в радиальном электрическом поле по величине должна равняться полоидальной скорости звука [58]. Измерения радиального электрического поля позволяют подтверждать предлагаемые физические модели, описывающие режим детач-

мента, а само изменение значения электрического поля может служить дополнительным индикатором перехода в режим детачмента. Кроме того, по уровню турбулентности можно судить о том, находится ли плазма в режиме улучшенного удержания с детачментом или же детачмент реализовался в режиме с плохим удержанием.

Концепция токамака ТРТ предполагает использование высокотемпературных сверхпроводящих магнитных катушек REBCO, которые позволяют получить магнитное поле на оси токамака $B_T = 8$ Тл при малых размерах токамака ($R = 2.15$ м, $a = 0.57$ м) [4]. При использовании высоких магнитных полей прогнозируется достижение $Q = 1$ в разрядах длительностью $t < 10$ с и достижение электронной и ионной температуры более 20 кэВ в центре плазменного шнура при вложенной мощности $P_{ext} = 30$ МВт. Однако, небольшое значение малого радиуса токамака и высокие ожидаемые температуры плазмы вызывают увеличение относительного ларморовского радиуса ($\rho^* = \rho / a$, где ρ — ларморовский радиус, а ρ — малый радиус токамака) до значений характерных для классических несверхпроводящих токамаков ($\rho_i^* = 7 \times 10^{-3}$, $\rho_e^* = 10^{-4}$), например, ASDEX-Upgrade [59]. Учитывая, что токамаки при работе в режимах с высокими значениями градиентов давления и температур подвержены развитию кинетической-баллонной неустойчивости и показывают значения потоков тепла в несколько гиробомовских величин (пропорциональных ρ^*) [60, 61], то перенос тепла может быть недостаточно малым для достижения заявленных параметров ТРТ, и получение температур более 20 кэВ в центре плазменного шнура может быть затруднено. В связи с этим полезным является вычисление величин переноса тепла в условиях токамака ТРТ с помощью кодов GKW [62] и GS2 [63] для анализа возможностей реализации сценария с $Q = 1$. Верификация этих кодов возможна только при наличии экспериментальных данных о плазменной турбулентности различных масштабов, которые можно получить с помощью диагностики ДОР.

3.3. Исследование МГД-неустойчивостей

Исследование магнитогидродинамической (МГД) активности в токамаке ТРТ представляет интерес в связи с поставленной задачей изучения ITER-подобной плазмы. Особый интерес представляет исследование альфвеновских мод (АМ). В токамаке ТРТ возможно возбуждение альфвеновских мод (АМ) высокоэнергичными ионами нагревных пучков или термоядерными альфа-частицами в D — Т-экспериментах. Возможность развития АМ в ТРТ и их характеристики исследовались методом моделирования [64]. Экспериментальное исследование пространственно-временной структуры различных

Таблица 1. Задачи диагностики ДОР для ТРТ

Исследование вращения плазмы	Исследование режимов улучшенного удержания	Исследование МГД неустойчивостей
- Измерение профиля поперечной скорости вращения плазмы - Возможность сопоставления экспериментальных измерений с результатами транспортного моделирования - Изучение реакции турбулентности на различные методы дополнительного нагрева	- Измерение профиля радиального электрического поля до и после перехода в H – режим - Измерение ширины скорости, как параметра ответственного за LH-переход - Изучение подавления турбулентности в области пьедестала - Возможность сопоставления с результатами гирокинетического моделирования - Изучение характеристик периферийно локализованных мод (ELMs) и филаментов во время ELMs - контроль режима детачмента и семи-детачмента	- Детектирование тиринг мод, оценка их размера, анализ сценария срыва - Детектирование различных альфвеновских мод, сравнение результатов с моделированием - Изучение различных колебательных процессов в плазме (геодезические-акустические моды (ГАМ), колебания предельного цикла (LCO) и др.)

альфвеновских мод может быть проведено много-частотным доплеровским рефлектометром. ДОР измеряет в области развития АМ колебания скорости на альфвеновской частоте, связанные с дрейфом плазмы в скрещенных переменным радиальном электрическом поле альфвеновской волны и магнитном поле токамака. Эффективность использования ДОР для исследования АМ была продемонстрирована на нескольких установках с магнитным удержанием плазмы [65, 66].

Кроме того, диагностика ДОР может быть использована для исследования тиринг мод (ТМ) [36], которые могут развиваться на ТРТ [55]. С помощью многочастотного ДОР можно получить сведения о структуре и локализации различных ТМ, что позволит изучать их влияние удержание плазмы и на сценарий срыва. Также, можно наблюдать влияние тиринг неустойчивости на скорость вращения плазмы в различных областях токамака.

Таким образом, задачи, определенные миссией ТРТ, которые может помочь решить диагностика ДОР, представлены в табл. 1.

4. АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА В ТОКАМАКЕ-РЕАКТОРЕ ТРТ

Для анализа возможности использования ДОР на ТРТ были проведены расчеты для случая зондирования плазмы обыкновенной волной (О-мода) для геометрии и ожидаемой электронной плотности на ТРТ. Был получен расчет отклика системы регистрации излучения, рассеянного на модельных флуктуациях, путем численного моделирования рассеяния и детектирования микроволнового излучения О-поляризации в линейном приближении в цилиндрической геометрии [67]. На ТРТ отсечка на обыкновенной волне доступна, так как цикло-

тронная частота выше частотного диапазона ДОР [68]. Также предполагается, что ввод зондирующего пучка проводится в экваториальной плоскости токамака со стороны слабого магнитного поля. Расчет проводился для двух сценариев разряда: базового сценария и разряда с примесью лития. Для оценки использовались радиальные профили плотности плазмы, которые были рассчитаны и представлены на рис. 11 и 15 в работе [4].

Под базовым подразумевается сценарий разряда с проектными характеристиками $I_p = 5 \text{ MA}$ и 50/50 дейтерий-третиевой плазме. Основным варьируемым параметром при конструировании базовых режимов разряда становится плотность плазмы n_e . Моделирование, представленное в работе [4], для 5 MA сценария в D-плазме показало, что в вышеуказанных предположениях длительность плато тока превосходит 100 с при плотности плазмы $n_e \leq 10 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.

Был проведен расчет с помощью одномерного кода для расчета лучевой траектории в цилиндрической геометрии. Данный код позволяет оценивать значения волновых векторов и радиуса в отсечке для выбранной геометрии и частот зондирования. В проведенном расчете использовалась геометрия ТРТ и электронная плотность в случае базового сценария разряда (см. рис. 11 в статье [4]). Результаты расчета приведены на рис. 1. На нем представлены значения волновых векторов и радиусов отсечек для серии возможных углов наклона антенны и частот зондирования. В общем было проанализировано 6 углов наклона от 35° до 5° с шагом 5° и 15 частот зондирования от 40 ГГц до 110 ГГц с шагом 5 ГГц. Расчет показывает, что ДОР с углами наклона и частотами из проанализированного диапазона дает возможность исследовать флуктуации в диапазоне волновых чисел от 1 см⁻¹ до 27 см⁻¹. В то же время положение

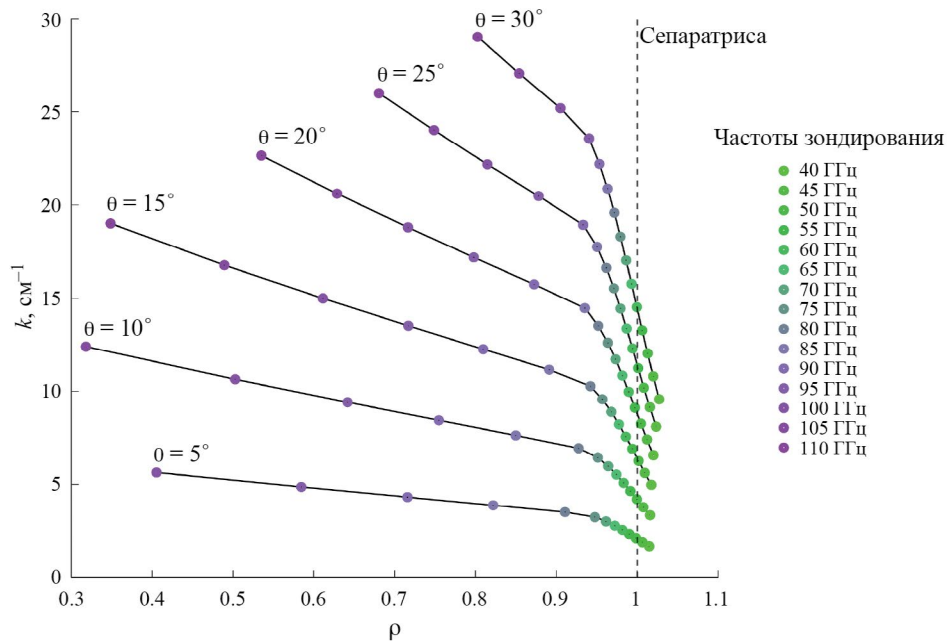


Рис. 1. Зависимость волнового вектора рассеивающих флуктуаций от нормализованного малого радиуса для различных частот зондирования в базовом режиме работы токамака ТРТ

отсечек находится в диапазоне ρ от 0.3 до 1.05, что соответствует областям плазмы от центральных областей до сепаратрисы. Можно отметить, что с увеличением угла наклона значения волновых векторов растут, и радиус отсечки увеличивается, что говорит о смещении отсечки в более периферийные области. Для расчетов распространения волн релятивизм электронов на данном этапе не учитывался, потому что отсечки для большинства частот зондирования во всём диапазоне углов оказывались в достаточно холодных областях разряда. Однако для малых углов и максимальных частот отсечки оказываются всё же при радиусах, соответствующих температуре электронов порядка 10–15 кэВ, что уже может повлиять на проведение измерений, поэтому в дальнейшем расчёты необходимо будет проводить с учётом эффекта релятивизма электронов.

Постепенное наращивание содержания лития в ТРТ является неотъемлемой составляющей всей программы исследований, нацеленной на достижение необходимого для любого термоядерного реактора приемлемого по техническим требованиям стационара взаимодействия плазмы со стенкой. Это связано с тем, что удельная мощность, необходимая для поддержания стационарных или длительных (> 30 с) разрядов с большим током, оказывается достаточно большой и значительно превышает предел, достигнутый в экспериментах с углеродным покрытием первой стенки. Использование лития

для экранировки первой стенки может облегчить ситуацию.

Для сценария разряда с литием (см. рис. 15 в статье [4]) также был проведен расчет с помощью одномерного кода для расчета лучевых траекторий в цилиндрической геометрии. Результаты расчета приведены на рис. 2. Расчет показывает, что ДОР дает возможность исследовать флуктуации в диапазоне волновых чисел от 1 см^{-1} до 27 см^{-1} . В то же время положение отсечек находится в диапазоне ρ от 0.95 до 1.06, что соответствует областям плазмы от сепаратрисы до обдирочного слоя (SOL). Можно отметить, что с увеличением угла наклона значения волновых векторов растут, и радиус отсечки увеличивается, что говорит о смещении отсечки в более периферийные области.

Результаты расчета показывают, что для исследования плазмы базового сценария ТРТ в диапазоне радиусов от середины плазменного шнура до его периферии потребуется создание генераторов, излучающих волны в V (40 ГГц — 75 ГГц) и W (75 ГГц — 110 ГГц) диапазонах. Это также означает, что на ТРТ возможно применение стандартных волноводов для О-волны. Изменение углов наклона антенн от 0° (нормальное падение, режим стандартной флуктуационной рефлектометрии) до 35° позволит исследовать различные типы флуктуаций плотности плазмы в диапазоне волновых чисел $1\text{--}27 \text{ см}^{-1}$.

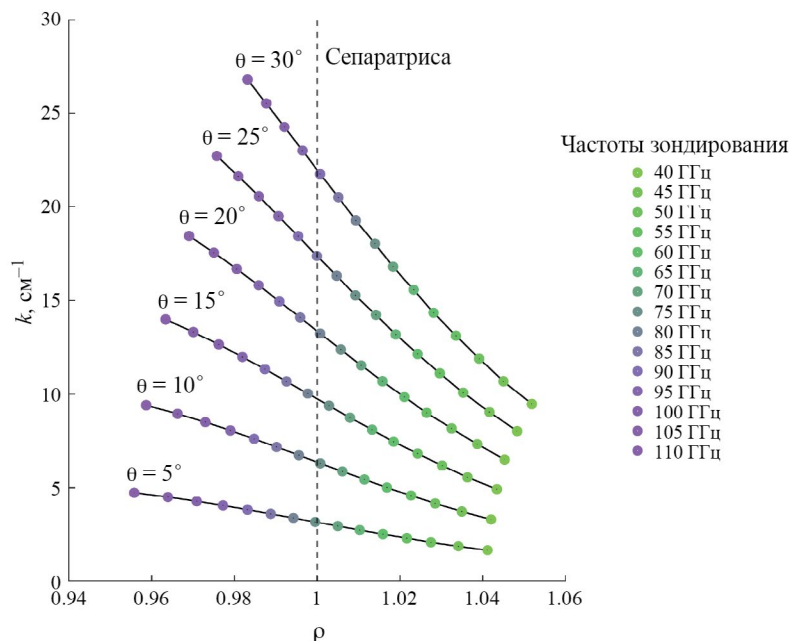


Рис. 2. Зависимость волнового вектора рассеивающих флуктуаций от нормализованного малого радиуса для различных частот зондирования в режиме работы токамака ТРТ с литием

5. РАЗРЕШЕНИЕ ДОР НА ТРТ

Конструкция ДОР должна быть оптимизирована относительно разрешающей способности диагностики по радиусу (Δr) и по волновым числам ($\Delta k_{\perp}$). Δr и $\Delta k_{\perp}$ определяются распределением поля зондирующего пучка в области отсечки. При заданном распределении поля в плазме оценки разрешающей способности диагностики ДОР по волновым числам $k_{\perp}$ и по радиусу для токамака ТРТ могут быть проведены путем моделирования экспериментов по рассеянию на флуктуациях плотности, имеющих узкий спектр по полоидальным волновым числам и локализованным по радиусу. Этим условиям удовлетворяют флуктуации в виде локализованной по радиусу полоидальной моды порядка m , задаваемой на малом радиусе r . Значение параметров r и m определяют значение полоидального волнового числа флуктуаций $k_{\perp} = m/r$. Параметры модельных флуктуаций r и $k_{\perp}$ изменялись в некотором диапазоне вблизи значений, определенных в точке поворота лучевой траектории. Мощность рассеянного излучения на флуктуациях с такими параметрами будет максимальной. Характерные размеры функции рассчитанных значений откликов ДР от параметров r и $k_{\perp}$ определяют разрешающие способности диагностики Δr и $\Delta k_{\perp}$.

Результаты расчета отклика диагностики ДОР на модельно заданные флуктуации представлены на рис. 3. На нем изображена зависимость амплитуды сигнала от радиуса и волнового числа при фиксированной частоте зондирующего излучения (50 ГГц).

Результаты получены с использованием численного моделирования микроволнового рассеяния, основанного на расчетах двумерной пространственной весовой функции в борновском приближении [67]. По значениям полуширины представленных зависимостей можно сделать оценку разрешающей способности диагностики. В случае ТРТ ожидается $\Delta r \approx 0.5$ см и $\Delta k_{\perp} \approx 0.5$ см⁻¹.

Поле зондирующего излучения в плазме задается распределением поля и радиусом кривизны его волнового фронта на выходе схемы формирования зондирующего излучения R . Это излучение предлагается направлять в плазму токамака ТРТ при помощи поворотного зеркала, позволяющего задать необходимый угол падения на плазменную поверхность (подробнее о системе поворота зеркал и размещении их в камере токамака ТРТ написано в разд. 7). Пользуясь рассмотренным методом определения разрешающей способности можно рассчитать оптимальные значения параметров зондирующего пучка на выходе схемы его формирования, обеспечивающие максимальное разрешение диагностики по волновым числам и по радиусу. При поиске оптимальных значений параметров пучка на зеркале в качестве исходных значений можно взять оценки для гауссовского пучка. Наилучшее разрешение по k для такого пучка с плоским фронтом в отсечке получается, когда его радиус равен

$$w_0^{opt} = \sqrt{\frac{k_0}{R_{pl}}} \quad [69], \quad R_{pl} - \text{радиус магнитной поверх-}$$

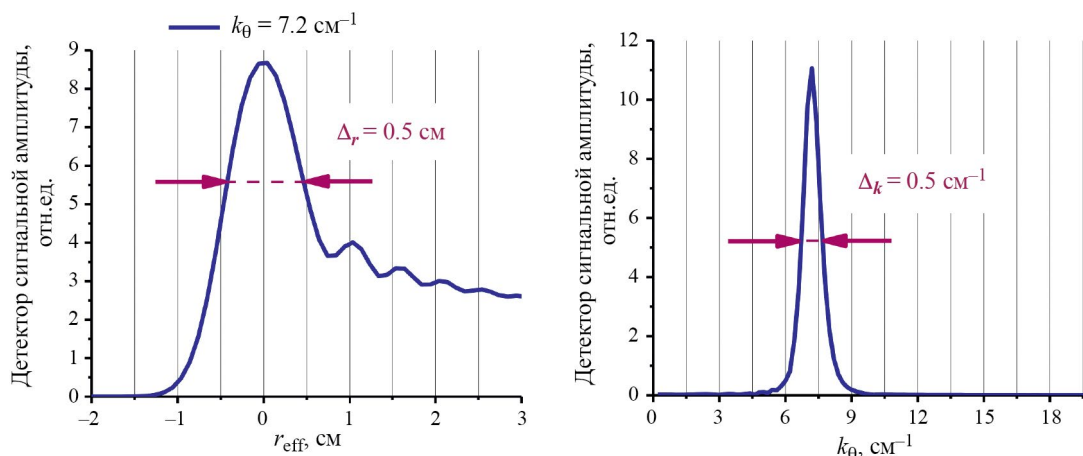


Рис. 3. Зависимость амплитуды синтезированного сигнала ДОР от (слева) расстояния от радиуса отсечки зондирующего излучения и от (справа) волнового вектора рассеивающих флуктуаций, задаваемых в модели.

ности в отсечке, а k_0 — волновой вектор зондирующего излучения в вакууме. $w_0^{opt} \approx 3.5$ см для частоты 50 ГГц. На расстоянии 100 см от отсечки для этой частоты, т. е. на зеркале, параметры пучка будут такие: $w \approx 6.7$ см, $R \approx -140$ см, где R — эффективный радиус волнового фронта [67].

Результаты расчета зависимости разрешения по волновому вектору от ширины антенны для частоты зондирования 50 ГГц представлены на рис. 4. Под шириной антенны здесь понимается геометрический размер раскрыва рупора антенны в направлении, которое перпендикулярно направлению волнового вектора и электрического поля зондирующего излучения. По получаемой зависимости можно оценить оптимальный размер антенны. В случае ТРТ можно предположить, что, так как разрешение минимально для значения $w = 10$ см, то это является самым оптимальным значением для данного параметра.

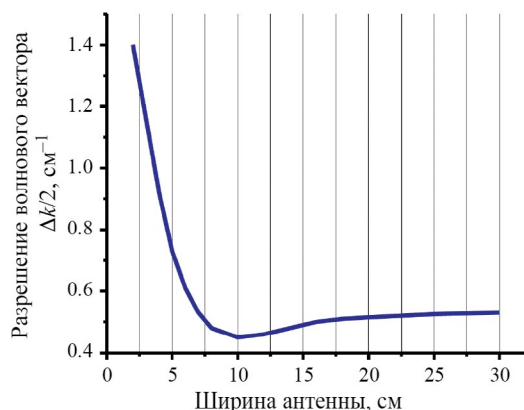


Рис. 4. Зависимость разрешения по волновому вектору от размера антенны для частоты зондирования 50 ГГц.

6. ДИЗАЙН СИСТЕМЫ ДОР НА ТРТ

Рассмотрим метод создания стабильной многоканальной системы, работающей в нескольких, в том числе и в V-диапазоне частот (40—75 ГГц) электромагнитных колебаний, которая позволяет одновременно измерять скорость распространения флуктуаций плотности и турбулентных потоков плазмы в нескольких различных пространственных точках для токамака с реакторными технологиями (ТРТ).

С учетом опыта построения систем рефлектометрии для Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) [70] и Т-15МД [68], предлагается построить систему ДОР для ТРТ по блочной технологии на основе высокочастотного генератора с низким фазовым шумом, объединенного с блоком фильтров и системой квадратурного детектирования. Система ДОР, работающая в V-диапазоне, предлагается к апробации на токамаке Т15-МД, где будет использоваться для отслеживания скорости потоков заряженных частиц в плазме, анализа турбулентности плотности по большей части радиуса плазмы во время таких событий, как: переход в режим улучшенного удержания плазмы, возникновение ГАМ и других процессов, ответственных за перенос энергии в плазме. Систему в W-диапазоне предполагается разработать по аналогии с системой в V-диапазоне, однако апробировать ее на токамаке Т15-МД не представляется возможным из-за слишком низких по сравнению с ТРТ значений плотности плазмы.

Схема предлагаемой системы представлена на рис. 5. За ее основу взята схема диагностики токамака J-TEXT [16] Блок генерации состоит из источников, полосовых фильтров, умножителей и смесителя. В качестве источников СВЧ-сигнала предполагается использование SynthHD — двухканального программно настраиваемого генератора

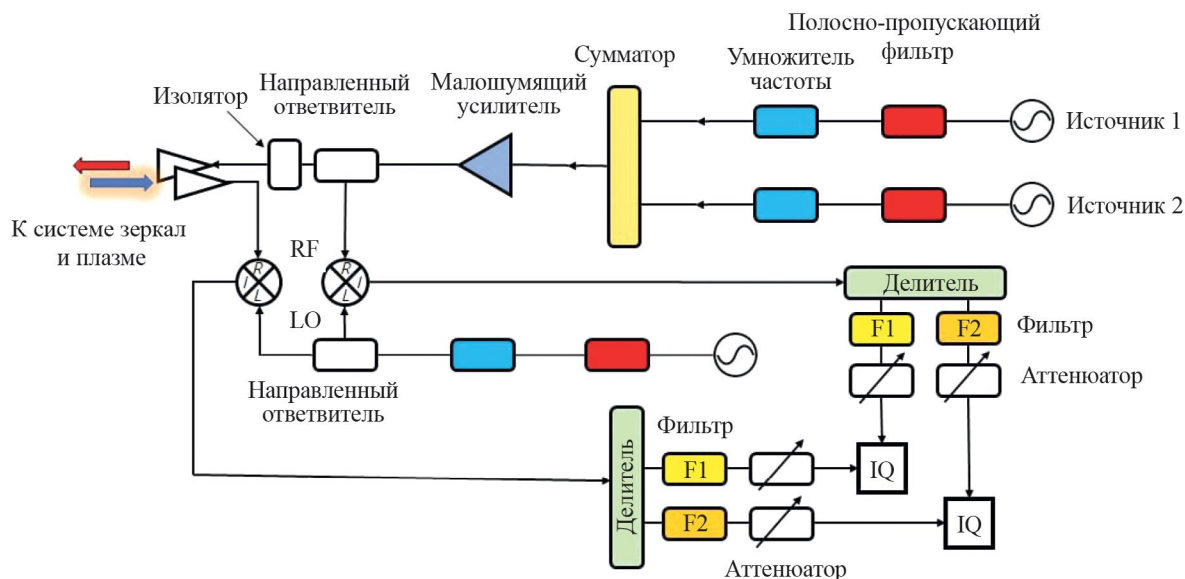


Рис. 5. Схема двухканальной системы ДОР.

радиочастотных сигналов в диапазоне от 10 МГц до 15 ГГц, управляемого и питаемого устройством под управлением операционной системы Windows или Android через USB-порт. Два независимых канала SynthHD (v2) можно настроить для работы на двух разных частотах или на одной частоте с разными фазами. Это позволяет использовать его для генерации квадратурного сигнала.

Источники обеспечивают управление частотой, фазой и амплитудой с разрешением по частоте 0,1 Гц, что позволяет перемещать частоту блока зондирующего сигнала по всему V-диапазону с использованием умножителя частоты.

Мощность и частота синтезаторов могут быть удаленно настроены; максимальная выходная мощность составляет 20 дБм. Частоты зондирования могут быть настроены для соответствия различным параметрам разряда. Для исключения влияния гармоник, генерируемых нелинейными эффектами, предлагается применить полосовой фильтр 8—12,5 ГГц. Умножители частот используются для умножения сигнала до V-диапазона. Затем сумматор объединяет сигналы двух или более каналов для вывода. В соответствии с характеристической кривой источника устанавливается соответствующая выходная мощность на соответствующей частоте.

В текущей конфигурации сигнал проходит через усилитель с низким уровнем шума V-диапазона и направленный ответвитель. Для зондирования и приема используется пара антенн, расположенных выше горизонтальной плоскости и параллельно ей. Перпендикулярное расстояние от геометрического центра двух антенн до горизонтальной плоскости выбирается в зависимости от возможностей систем

зеркал, и должно быть эквивалентно полярному углу приблизительно в 15—20°.

Генератор канала (ЛО) имеет такую же структуру, что и каждый канал (RF), и сигнал отправляется на порт LO миксеров. Полученный рассеянный сигнал направляется на порт RF миксера для получения промежуточной частоты (IF). Стоит отметить, что частота зондирования канала LO и нескольких RF каналов должна поддерживать определенное соотношение для получения фиксированных промежуточных частот (например, 1, 2, 3 или 4 ГГц) для фазовых IQ детекторов.

В блоке многоканальной демодуляции преобразованные промежуточные частоты направляются в блок многоканальной демодуляции. В этом блоке структуры канала детекции и опорного канала являются зеркальными отражениями: широкополосный четырехканальный делитель мощности разделит сигналы на два или более канала, и несколько узкополосных фильтров (1, 2, 3 или 4 ГГц) с полосой пропускания около 100 МГц будут использоваться для выбора сигнала с конкретной, используемой для зондирования волной. Мощность принятого рассеянного сигнала может варьироваться с помощью аттенуаторов и должна быть достаточной для обеспечения работы фазового IQ детектора.

В качестве антенной системы диагностики предлагается применять конические рупорные антенны с прямоугольным волноводом WR-15 и двумя поворотными зеркалами для фокусировки пучка зондирующего излучения, находящихся внутри вакуумной камеры T-15МД на уровне экваториального диагностического порта. В связи с этим принято

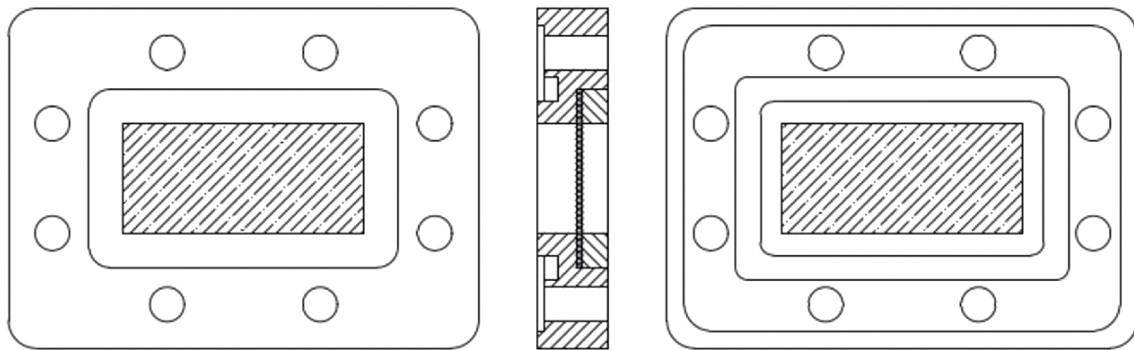
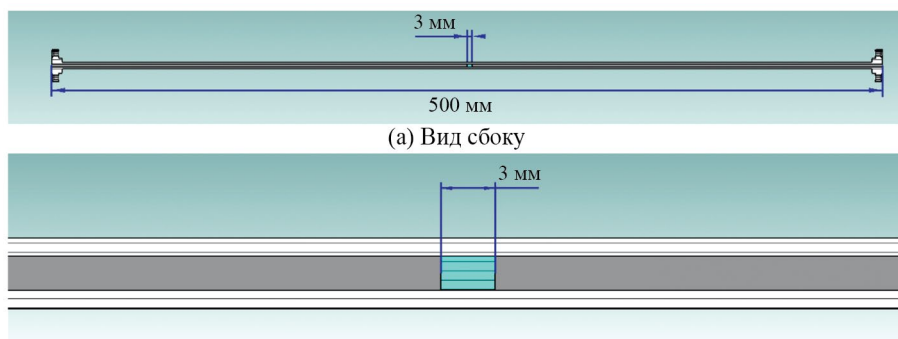


Рис. 6. Схема устройства типового прямоугольного вакуумного окна с кварцевым стеклом фирмы HENGDA MICROWAVE (Китай).



б) Место расположения кварцевого стекла толщиной 3 мм

Рис. 7. Упрощённая модель волновода (без присоединительных фланцев) с кварцевым стеклом в CST.

решение применить волноводные соединительные фланцы с вакуумным уплотнением из кварцевого стекла по типу вакуумных радиопрозрачных окон HD-620WG фирмы HENGDA MICROWAVE (рис. 6).

Для получения расчётных данных о коэффициенте передачи сигнала в программной среде электродинамического моделирования CST MW STUDIO была построена упрощённая модель волновода (рис. 7).

Расчетные (CST) коэффициенты передачи S21 для разных толщин кварцевого стекла (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=3,5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan\delta=0,0004$) в такой волноводной системе показаны на рис. 8.

В качестве альтернативы предлагается использование окон для ввода зондирующего и приемного сигналов на основе вспененного полиметакрилимиды ROHACELL 71 HF by EVONIK ($\epsilon=1,09$ $\tan\delta=0,0038$), применяемые на Т15МД.

Несмотря на то, что никаких существенных проблем с этой диагностикой в стационарном режиме работы не ожидается [71], стоит соблюдать необходимые меры предосторожности при разработке системы. В частности, необходимо установить частотные филь-

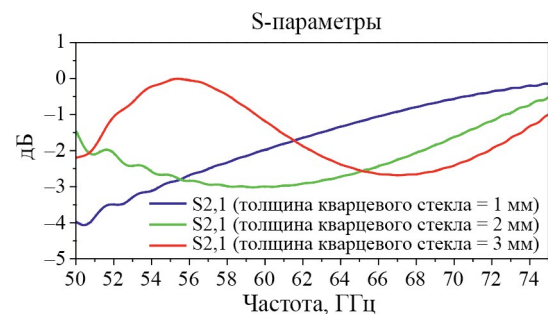


Рис. 8. S-параметры кварцевых стекол разной толщины в волноводной системе в диапазоне 50 ÷ 75 ГГц.

тры из-за запланированных на ТРТ экспериментов по электронно-циклотронному нагреву, которые могут привести к повреждению микроволновой системы [72], [43]. Помимо этого нужно аккуратно устанавливать направление зондирующего электромагнитного пучка, так как наличие ненулевой составляющей волнового вектора вдоль магнитного поля в токамаке может привести к нелокальности области измерений и ухудшению разрешения по волновым числам [73].

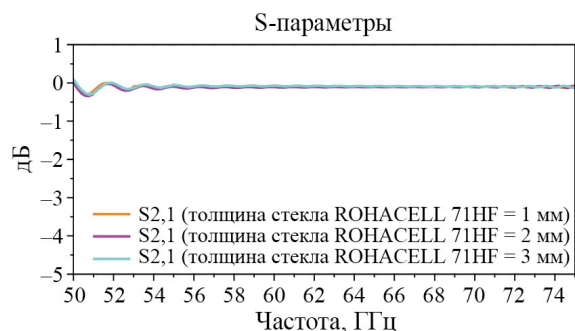


Рис. 9. S-параметры стекол ROHACELL 71 HF разной толщины в волноводной системе в диапазоне 50 ÷ 75 ГГц.

7. УСТАНОВКА ДОР НА ТРТ

Схема генерации и детектирования зондирующего и приёмного электромагнитного излучения будет находиться снаружи от вакуумной камеры, а системы антенн и поворотных-фокусирующих зеркал расположатся внутри вакуумного патрубка токамака ТРТ. Предлагается расположить вакуумные элементы ДОР таким образом, чтобы в экваториальной плоскости при угле наклона зондирующего излучения 15 градусов, который соответствует центральному значению всего рабочего диапазона углов, отсечка зондирующего излучения находилась вблизи экваториальной плоскости токамака. Возможная схема расположения элементов ДОР в вакуумной камере ТРТ представлена на рис. 10. Из генератора, находящегося снаружи от вакуумного патрубка, через прозрачное для СВЧ-волны вакуумное уплотнение электромагнитное излучение будет поступать по сверхразмерному длинному волноводу прямоугольной формы (1 на рис. 10) в коническую рупорную антенну (2 на рис. 10). Сверхразмерный волновод нужен для минимизации потери мощности при приеме-передаче сигнала. А для согласования тракта необходимо будет использовать волноводный переход со сверхразмерного волновода к выбранному стандарту (например, WR-15 для V-диапазона частот), который будет располагаться между элементами 1 и 2 на рис. 10. Далее СВЧ-излучение из антенны 2 поступает на параболическое зеркало 3, которое будет рассчитано таким образом, чтобы фокусировать волну в область предполагаемой отсечки (несколько сантиметров внутри сепаратрисы). Во избежание aberrаций зеркало 3 не будет иметь возможности поворота. Необходимый угол наклона зондирующего пучка будет определяться поворотом плоского зеркала 4, которое с помощью подвижного поршня 5 сможет менять свой наклон. После отражения от фокусирующего параболического зеркала 3 и поворотного плоского зеркала 4 излучение будет поступать в плазму

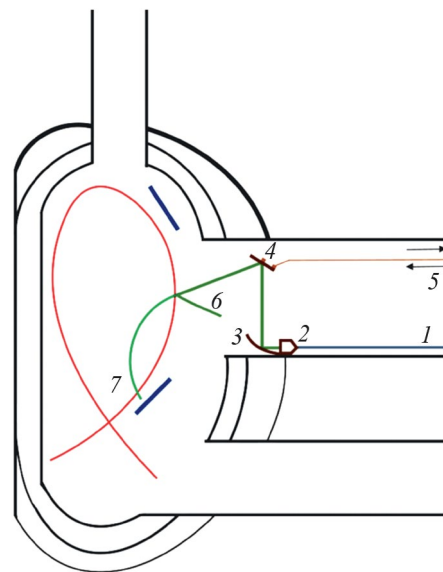


Рис. 10. Элементы ДОР на ТРТ: 1 — длинный волновод (О-мода), 2 — конусная антенна, 3 — фиксированный параболический отражатель, 4 — плоский подвижной отражатель, 5 — поршень (для обеспечения поворота элемента 4), 6 и 7 — лучевые траектории для частот зондирования 40 и 110 ГГц.

токамака ТРТ, где в области отсечки будут отражаться от магнитной поверхности с критической концентрацией. На рисунке 10 продемонстрированы лучевые траектории зондирующего излучения, рассчитанные с помощью двумерного кода для минимальной (6, частота 40 ГГц) и максимальной (7, частота 110 ГГц) частот во всём диапазоне предлагаемой схемы ДОР в случае базового сценария разряда (см. рис. 11 в статье [4]). Лучевая траектория примерно соответствует максимуму мощности вводимого в плазму электромагнитного пучка, а точка перегиба этой траектории соответствует области наиболее эффективного рассеяния на флуктуациях плотности, то есть области локализации измерений.

В представленном на рис. 10 варианте расположения вакуумных составляющих схемы ДОР элементы 1, 2 и 3 предполагается закрепить на нижней стенке патрубка, а элементы 4 и 5 — на верхней стенке. При этом данная конфигурация является наиболее простой, но не необходимой. Все элементы можно закрепить и на одной стенке, уменьшив расстояние между зеркалами 3 и 4. При этом изменятся необходимые для осуществления зондирования плазмы углы поворота зеркала 4 и кривизна фокусирующего зеркала 3. Однако основные выводы и расчёты, представленные в статье, не изменятся. Модификация представленной на рис. 10 схемы расположения может понадобиться, например, для размещения других диагностических систем

в непосредственной близости от вакуумных элементов ДОР. Кроме этого нужно понимать, что обозначенная цифрой 2 на рис. 10 антенна на самом деле является совокупностью 4-х антенн, так как на каждый диапазон (V и W) необходимо по паре антенн — приемной и передающей.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны физические принципы метода доплеровского обратного рассеяния и подробно рассмотрены физические задачи, которые могут быть решены на токамаке ТРТ с помощью этой диагностики. В результате сопоставления основных задач ТРТ с возможностями метода доплеровского обратного рассеяния можно заключить, что данная диагностика будет способствовать решению сразу целого набора стоящих перед ТРТ задач и, более того, может стать ключевой при понимании физики некоторых процессов в горячей области плазмы ТРТ. Мировая практика использования диагностики ДОР, которая установлена на всех крупных установках с магнитным удержанием плазмы, подтверждает сделанные в разд. 3 выводы.

Предложена конкретная конфигурация схемы диагностики ДОР, которая обладает хорошими пространственным разрешением порядка 1 см и разрешением по волновым числам порядка 1 см^{-1} . Схема позволяет зондировать плазму ТРТ в широком диапазоне радиусов от сепаратрисы до примерно половины малого радиуса, а также пригодна для исследования флуктуаций плотности плазмы в широком диапазоне волновых чисел от 0 до 30 см^{-1} . Положения областей исследования и выбор масштаба рассеивающих флуктуаций предполагается осуществлять подвижным зеркалом, поворот которого будет осуществляться при помощи поршневой системы.

Предложенная схема расположения вакуумных элементов в патрубке токамака может быть легко модернизирована с целью размещения других диагностических систем в непосредственной близости от ДОР. При этом качество решения этим методом задач останется неизменным, так как пространственное перемещение элементов на этапе планирования не приведет к уменьшению разрешения метода или смещению области регистрации. Кроме этого число решаемых ДОР задач может быть существенно увеличено путем модернизации СВЧ-схемы. Так, например, может быть увеличено число частотных каналов (путем установки дополнительных генераторов или посредством амплитудной модуляции зондирующего излучения) для одновременного исследования быстрых процессов в плазме на различных радиусах или проведения исследования корреляционных свойств плазменной турбулентности.

Для обработки данных и интерпретации результатов диагностики ДОР помимо классических методов, таких как спектральный и корреляционный анализ, в настоящее время развиваются новейшие техники, которые также предлагается применить на токамаке ТРТ. К таким техникам относится использование искусственного интеллекта (ИИ), который позволяет, например, автоматизировать процесс нахождения особенностей в сигнале диагностики, соответствующих различным происходящим в плазме процессам (например, возникновению неустойчивостей или срывам и т. д.). Работа ИИ, обрабатывающего данные ДОР совместно с данными других диагностик в режиме реального времени, может поспособствовать разработке и внедрению систем обратной связи, предотвращающих нежелательные для работы ТРТ события.

Использование диагностики ДОР, как инструмента для исследования турбулентности, поспособствует развитию гирокинетического моделирования плазмы ТРТ. Именно возможность апробации его результатов в эксперименте является неотъемлемой составляющей любого гирокинетического моделирования, так как только возможность сравнения с экспериментом способна подтвердить или опровергнуть используемую в расчетах модель. Особенностью ДОР является селективность по волновому вектору плазменных флуктуаций, а предложенная в статье схема позволяет менять исследуемые волновые вектора в широком диапазоне значений. Это обстоятельство оказывается весьма удобным для проведения сравнения экспериментальных данных и модельных расчетов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № FSEG-2024-0005 с использованием Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях", включающего Уникальную научную установку "Сферический токамак Глобус-М".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kikuchi M. // *Energies*. 2010. V. 3. P. 1741. <https://doi.org/10.3390/en3111741>
2. Song Y. // *E3S Web of Conferences*. 2021. V. 292. 02067 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129202067>
3. Krasilnikov A. V., Kononov S. V., Bondarchuk E. N., Mazul' I. V., Rodin I. Yu., Mineev A. B., Kuz'min E. G., Kavin A. A., Karpov D. A., Leonov V. M., Khayrutdinov R. R., Kukushkin A. S., Portnov D. V., Ivanov A. A., Belchenko Yu. I.,

- Denisov G. G. // Plasma Phys. Rep. 2021. V. 47. P. 1092. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21110192>
4. Leonov V. M., Konovalov S. V., Zhogolev V. E., Kavin A. A., Krasilnikov A. V., Kuyanov A. Yu., Lukash V. E., Minneev A. B., Khayrutdinov R. R. // Plasma Physics Reports. 2021. V. 47. P. 1107. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21120047>
 5. Silva C., Solano E. R., Hillesheim J. C., Delabie E., Birk-enmeier G., Gil L., Giroud C., Morales R. B., Nina D. and JET Contributors // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. 126057 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac97f4>
 6. Feng X. A., Liu D., Zhou C., Wang M. Y., Zhang J., Liu Z. Y., Liu Y., Zhou T. F., Zhang S. B., Kong D. F., Hu L. Q., Ji J. X., Fan H. R., Li H., Lan T., Xie J. L., Mao W. Z., Liu Z. X., Ding G., Zhuang W. X., Liu W. D. // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. 024704 <https://doi.org/10.1063/1.5075615>
 7. Höfler K., Happel T., Hennequin P., Stroth U., Cavedon M., Dux R., Fischer R., McDermott R. M., Poli E., Schuster C. U. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. 035020 <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abd896>
 8. Vermare L., Hennequin P., Honoré C., Peret M., Dif-Pradalier G., Garbet X., Gunn² J., Bourdelle C., Clairet F., Morales J., Dumont R., Goniche M., Maget P., Varennes R. and the WEST Team // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. 026002 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac3c85>
 9. Rhodes T. L., Michael C. A., Shi P., Scannell R., Storment S., Pratt Q., Lantsov R., Fitzgerald I., Hall-Chen V. H., Crocker N. A., Peebles W. A. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. 113549 <https://doi.org/10.1063/5.0101848>
 10. Yashin A. Yu., Bulanin V. V., Petrov A. V., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I. and Petrov Yu. V. // J. Instrum. 2019. V. 14. C10025 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/10/C10025>
 11. Damba J., Pratt Q., Hall-Chen V. H., Hong R., Lantsov R., Ellis R., Rhodes T. L. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. 103549 <https://doi.org/10.1063/5.0101864>
 12. Molina Cabrera P. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. 083503 <https://doi.org/10.1063/1.5007433>
 13. Shi Z. Wulu Zhong, Min Jiang, Zengchen Yang, Boyu Zhang, Peiwan Shi, Wei Chen, Jie Wen Chengyuan Chen, Bingzhong Fu, Zetian Liu, Xuanton Ding, Qingwei Yang, Xuru Duan // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. 113501 <https://doi.org/10.1063/1.4966680>
 14. Yashin A., Alexander Belokurov, Leonid Askinazi, Alexander Petrov and the TUMAN-3M Team // Atoms. 2022. V. 10. 106 <https://doi.org/10.3390/atoms10040106>
 15. Krutkin O. L., Altukhov A. B., Gurchenko A. D., Gusekov E. Z., Irzak M. A., Esipov L. A., Sidorov A. V., Chôné L., Kiviniemi T. P., Leerink S., Niskala P., Lechte C., Heuraux S. and Zadviitskiy G. // Nucl. Fusion. 2019. 59096017 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cfb>
 16. Ren X. H., Yang Z. J., Shi Z. B., Yang Z. C., Zha X. Q., Gao Y., Zhang Z. C. // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. 033545 <https://doi.org/10.1063/5.0040915>
 17. Estrada T. D. Carralero, Windisch T., Sánchez E., García-Regaña J. M., Martínez-Fernández J., A. de la Peña, Velasco J. L., Alonso J. A., Beurskens M., Bozhnikov S., Damm H., Fuchert G., Kleiber R., Pablant N., Pasch E. and the W7-X team // Nucl. Fusion. 2021. V. 61. 046008 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abddee>
 18. Estrada T., Sánchez E., García-Regaña J. M., Alonso J. A., Ascasíbar E., Calvo I., Cappa A., Carralero D., Hidalgo C., Liniers M., Pastor I., Velasco J. L. and the TJ-II Team // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. 076021 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1940>
 19. Nasu T., Tokuzawa T., Tsujimura T. I., Ida K., Yoshinuma M., Kobayashi T., Tanaka K., Emoto M., Inagaki S., Ejiri A., Kohagura J. // Rev. Sci. Instrum. 2022. 93 113518 <https://doi.org/10.1063/5.0101588>
 20. Kondo Y., Ohshima S., Kuwahara D., Inoshita K., Fukuda T., Minami T., Kado S., Kobayashi S., Konoshima S., Mizuuchi T., Okada H., Tomita T. and Nagasaki K. // J. Instrum. 2022. V. 17. C05023 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/05/C05023>
 21. Kharchevskii A. A., Bogachev N. N., Belukhov S. P., Malakhov D. V., Skvortsova N. N. and Guseinzade N. G. // J. Instrum. 2020. V. 15. C01038 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/01/C01038>
 22. Carralero D., Happel T., Estrada T., Tokuzawa T., Martínez J., E. de la Luna, Cappa A., García J. // Fusion Eng. Des. 2021. V. 173. 112803 <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112803>
 23. Muscatello C. M., Anderson J. P., Boivin R. L., Finkenthal D. K., Gattuso A., Kramer G. J., LeSher M., Mrazkova T. J., Neilson G. H., Peebles W. A., Rhodes T. L., Robinson J. T., Torreblanca H., Zeller K., Zeng L., Zolfaghari A. // Rev. Sci. Instrum. 2021. V. 92. 033524 <https://doi.org/10.1063/5.0040255>
 24. Conway G. D., Schirmer J., Kluge S., Suttrop W., Holzhauser E. and the ASDEX Upgrade Team // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. 951 <https://doi.org/10.1088/0741-3335/46/6/003>
 25. Schirmer J., Conway G. D., Holzhauser E., Suttrop W., Zohm H. and the ASDEX Upgrade Team // Plasma Phys. Control. Fusion. 2007. V. 49. 1019 <https://doi.org/10.1088/0741-3335/49/7/006>
 26. Pinzón J., Happel R. T., Hennequin P., Angioni C., Estrada T., Lebschy A., Stroth U. and the ASDEX Upgrade Team // Nucl. Fusion. 2019. 59074002 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab227e>
 27. Gusakov E. Z. and Surkov A. V. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. P. 1143 <https://doi.org/10.1088/0741-3335/46/7/012>

28. Yashin A., Bulanin V., Petrov A., Ponomarenko A. // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 8975 <https://doi.org/10.3390/app11198975>
29. Ponomarenko A., Yashin A., Kurskiev G., Minaev V., Petrov A., Petrov Yu., Sakharov N., Zhiltsov N. // Sensors. 2023. V. 23. P. 830 <https://doi.org/10.3390/s23020830>
30. Yashin A. Yu., Bulanin V. V., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V. and Tolstyakov S. Yu. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. 112009 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aac4d8>
31. Grover O., Manz P., Yashin A. Y., Réfy D. I., Seidl J., Vianello N., Birkenmeier G., Solano E. R., Sos M., Bohm P., Bilkova P., Hron M., Panek R., the ASDEX Upgrade Team, the COMPASS Team, the Globus-M Team and JET Contributors // Nucl. Fusion. 2024. V. 64. 026001 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad0eae>
32. Ponomarenko A., Gusev V., Kiselev E., Kurskiev G., Minaev V., Petrov A., Petrov Yu., Sakharov N., Solokha V., Teplova N., Shchegolev P., Yashin A. and Zhiltsov N. // Nucl. Fusion. 2024. V. 64. 022001 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad0ead>
33. Yashin A. Y., Bulanin V. V., Petrov A. V., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov Yu. V. // Plasma Physics Reports. 2020. V. 46. P. 683 <https://doi.org/10.1134/S1063780X20070107>
34. Bulanin V. V., Gusev V. K., Khromov N. A., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov M. A., Petrov Yu. V., Prisyazhnyuk D., Sakharov N. V., Tolstyakov S. Yu. and Yashin A. Yu. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. 096026 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2cdf>
35. Bulanin V. V., Kurskiev G. S., Solokha V. V., Yashin A. Yu. and Zhiltsov N. S. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. 122001 <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac36a4>
36. Yashin A., Ponomarenko A., Balachenkov I., Kurskiev G., Kiselev E., Minaev V., Petrov A., Petrov Yu., Sakharov N., Zhiltsov N. // Appl. Sci. 2023. V. 13. 3430 <https://doi.org/10.3390/app13063430>
37. Bulanin V. V., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V., Prisyazhnyuk D. V., Sakharov N. V., Solokha V. V., Tolstyakov S. Yu., Khromov N. A., Yashin A. Yu. // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45. P. 977. <https://doi.org/10.1134/S1063785019100055>
38. Bulanin V. V., Wagner F., Varfolomeev V. I., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V., Prisyazhnyuk D. V., Sakharov N. V., Tolstyakov S. Yu., Khromov N. A., Shchegolev P. B., Yashin A. Yu. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 375 <https://doi.org/10.1134/S106378501405006X>
39. Yashin A. Yu., Bulanin V. V., Gusev V. K., Kiselev E. O., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V., Ponomarenko A. M. and Shchegolev P. B. // Nucl. Fusion. 2021. V. 61. 092001 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac1297>
40. Bulanin V. V., Bakharev N. N., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V., Sakharov N. V., Shchegolev P. B., Telnova A. Yu., Tolstyakov S. Yu., Yashin A. Yu. // Phys. Atom. Nuclei. 2020. V. 83. P. 1124. <https://doi.org/10.1134/S1063778820070042>
41. Bulanin V. V., Balachenkov I. M., Varfolomeev V. I., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V., Ponomarenko A. M., Telnova A. Yu., Shchegolev P. B., Yashin A. Yu. // Tech. Phys. Lett. 2021. V. 47. P. 197. <https://doi.org/10.1134/S1063785021020206>
42. Balachenkov I. M., Petrov Yu. V., Gusev V. K., Bakharev N. N., Bulanin V. V., Varfolomeev V. I., Zhiltsov N. S., Kiselev E. O., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Ponomarenko A. M., Sakharov N. V., Telnova A. Yu., Tokarev V. A., Khromov N. A., Shchegolev P. B., Yashin A. Yu. // Tech. Phys. Lett. 2020. 46. P. 1157 <https://doi.org/10.1134/S1063785020120032>
43. Белоусов В. И., Денисов Г. Г., Шмелев М. Ю. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 1038. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110147>
44. Бельченко Ю. И., Бурдаков А. В., Давыденко В. И., Горбовский А. И., Емелев И. С., Иванов А. А., Санин А. Л., Сотников О. З. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 1031. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110135>
45. Conway G. D., Smolyakov A. I. and Ido T. // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. 013001 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac0dd1>
46. Conway G. D., Angioni C., Ryter F., Sauter P., and Vicente J. (ASDEX Upgrade Team) // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. 065001 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.065001>
47. Zohm H., Adamek J., Angioni C., Antar G., Atanasiu C. V., Balden M., Becker W., Behler K., Behringer K., Bergmann A., Bertoncelli T., Bilato R., Bobkov V., Boom J., Bottino A., Brambilla M., Braun F., Brüdgam M., Bühler I. A., Chankin A., Classen I. I., Conway G. D., Coster D. P., P. de Marne, D'Inca R., Drube R., Dux R., T. Eich, K. Engelhardt, B. Esposito, H.-U. Fahrbach, Fattorini L., Fink J., Fischer R., Flaws A., Foley M., Forestet C. et al. // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. P. 104009 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/10/104009>
48. Ruiz Ruiz J., Parra F. I., Hall-Chen V. H., Christen N., Barnes M., Candy J., Garcia J., Giroud C., Guttenfelder W., Hillesheim J. C., Holland C., Howard N. T., Ren Y., White A. E. and JET contributors // Plasma Phys. Control. Fusion. 2022. V. 64. P. 055019 <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac5916>
49. Van Oost G., Adamek J., Antoni V., Balan P., Boedo J. A., Devynck P., Duran I., Eliseev L., Gunn J. P., Hron M., Ionita C., Jachmich S., Kirnev G. S., Martinez E.,

- Melnikov A., Schrittwieser R., Silva C., Stöckel J., Tandler M., Varandas C., Van Schoor M., Vershkov V. and Weynants R. R. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2003. V. 45. P. 621 <https://doi.org/10.1088/0741-3335/45/5/308>
50. Da Silva F., Heuraux S. and Manso M. // *Nucl. Fusion*. 2006. V. 46. S816 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/9/S17>
51. Hill D. N. // *Journal of Nuclear Materials*. 1997. V. 241—243. P. 182. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(97\)80039-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)80039-6)
52. Ponomarenko A., Gusev V., Kiselev E., Kurskiev G., Minaev V., Petrov A., Petrov Y., Sakharov N., Solokha V., Teplova N., Shchegolev P., Yashin A. and Zhiltsov N. // *Nucl. Fusion*. 2023. V. 64. P. 022001 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad0ead>
53. Kirk A. B. Koch, Scannell R., Wilson H. R., Counsell G., Dowling J., Herrmann A., Martin R., and Walsh M. (the MAST team) // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96. P. 185001 <https://doi.org/10.1103/Phys. Rev. Lett. 96.185001>
54. Bulanin V. V., Gusev V. K., Khromov N. A., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov M. A., Petrov Yu. V., Prisiazhniuk D., Sakharov N. V., Tolstyakov S. Yu. and Yashin A. Yu. // *Nucl. Fusion*. 2019. V. 59. 096026 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2cdf>
55. Медведев С. Ю., Мартынов А. А., Коновалов С. В., Леонов В. М., Лукаш Э. М., Хайрутдинов Р. Р. // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. № 11. С. 998. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110226>
56. Yashin A. et al. 2022. Sensors. 229441. <https://doi.org/10.3390/s22239441>
57. Kukushkin A. S., Pshenov A. A. // *Plasma Physics Reports*. 2021. V. 47. P. 1238 <https://doi.org/10.1134/S1063780X21110209>
58. Senichenkov I., Kaveeva E., Rozhansky V., Shtyrkhunov N., Voskoboinikov S., Coster D. // *Contrib. Plasma Phys.* 2022. V. 62. e202100177 <https://doi.org/10.1002/ctpp.202100177>
59. Schneider P. A., Bustos A., Hennequin P., Ryter F., Bernert M., Cavedon M., Dunne M. G., Fischer R., Görler T., Happel T., Igochine V., Kurzan B., Lebschyl A., McDermott R. M., Morel P., Willensdorfer M., the ASDEX Upgrade Team I and The EUROfusion MST Team // *Nucl. Fusion*. 2017. V. 57. 066003. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa65b3>
60. Grandgirard V. et al // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2007. V. 49. B173 <https://doi.org/10.1088/0741-3335/49/12B/S16>
61. Doerk H. // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. P. 042503 <https://doi.org/10.1063/1.4916579>
62. Peeters A. G. // *Computer Physics Communications*. 2009. V. 180. P. 2650. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.07.001>
63. <https://gyrokinetics.gitlab.io/gs2/>
64. Исаев М. Ю., Леонов В. М., Медведев С. Ю. // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. № 11. С. 1016 <https://doi.org/10.31857/S0367292121110184>
65. Estrada T., Happel T. and Blanco E. // *Nucl. Fusion*. 2012. V. 52. 082002. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/52/8/082002>
66. Bulanin V. V., Gusev V. K., Kurskiev G. S., Minaev V. B., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V., Yashin A. Yu. // *Tech. Phys. Lett.* 2019. V. 45. P. 1107. <https://doi.org/10.1134/S1063785019110051>
67. Bulanin V. V., Yafanov M. V. // *Plasma Physics Reports*. 2006. V. 32. P. 47. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06010053>
68. Shelukhin D. A., Subbotin G. F., Vershkov V. A., Vladimirov I. A. // *Plasma Physics Reports*. 2022. V. 48. P. 721 <https://doi.org/10.1134/S1063780X22600402>
69. Happel T., Estrada T., Blanco E., Tribaldos V., Cappa A., Bustos A. // *Rev. Sci. Instrum.* 2009. V. 80. P. 073502 <https://doi.org/10.1063/1.3160106>
70. Vayakis G., Walker C. I., Clairet F., Sabot R., Tribaldos V., Estrada T., Blanco E., Sánchez J., Denisov G. G., Belousov V. I., Da Silva F., Varela P., Manso M. E., Cupido L., Dias J., Valverde N., Vershkov V. A., Shelukhin D. A., Soldatov S. V., Urazbaev A. O., Frolov E. Yu. and Heuraux S. // *Nucl. Fusion*. 2006. V. 46. S836 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/9/S20>
71. Hartfuss H.-J., König R. and Werner A. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2006. V. 48. R83 <https://doi.org/10.1088/0741-3335/48/10/R01>
72. Hansen S. K., Jacobsen A. S., Willensdorfer M., Nielsen S. K., Stober J., Höfler K., Maraschek M., Fischer R., Dunne M., the EUROfusion MST1 team and the ASDEX Upgrade team // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2021. V. 63. 095002 <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac0fd0>
73. Hall-Chen V. H., Parra Felix I. and Hille-sheim Jon C. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2022. V. 64. 095002 <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac57a1>

Concept of the Doppler Backscattering Diagnostic on TRT

A.Yu. Yashin^{a,b,*}, A.M. Ponomarenko^a, V.V. Solokha^{a,b}, S.S. Rozhkov^c, A.A. Kharchevskii^d

^a *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russian Federation*

^b *Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russian Federation*

^c *Joint Stock Company "Vector Research Institute", Saint Petersburg, Russian Federation*

^d *MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation*

^{*} *e-mail: alex_yashin@list.ru*

The paper discusses the possibility of using the Doppler backscattering (DBS) diagnostic to aid the Tokamak with Reactor Technologies (TRT) with its mission, and also offers ways of installing it in TRT, including the possible technical characteristics of the system. One of the most important advantages of DBS implementation is the ability to investigate various areas of plasma. This requires selecting an appropriate range of probing frequencies to match the scenarios and density profiles expected in TRT. Aspects and advantages of different ways of implementing DBS in the tokamak are discussed. Possible hardware, design and arrangement of the antenna system are presented. There are also system limitations that need to be considered specifically for TRT. The propositions for DBS on TRT are supported by calculations of ray tracing and diagnostic resolution. The wave number values of plasma fluctuations that the system could detect are also estimated.

Keywords: plasma diagnostics, thermonuclear reactor, tokamak with reactor technologies, TRT, Doppler backscattering, Doppler reflectometry