

УДК 533.9

ОБЪЕДИНЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ И ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ ДИВЕРТОРА И X-ТОЧКИ В ТОКАМАКЕ С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

© 2022 г. Е. Е. Мухин^{a, *}, С. Ю. Толстяков^a, Г. С. Курскиев^a, Н. С. Жильцов^a, А. Н. Коваль^a, В. А. Соловей^b, А. В. Горбунов^c, А. В. Горшков^c, Г. М. Асадулин^c, А. Ф. Корнев^d, А. М. Макаров^d, Д. Л. Богачев^e, Н. А. Бабинов^a, Д. С. Самсонов^a, А. Г. Раздобарин^a, А. Н. Баженов^a, И. М. Букреев^a, А. М. Дмитриев^a, Д. И. Елец^a, В. А. Сениченков^a, И. Б. Терещенко^a, Л. А. Варшавчик^a, И. А. Ходунов^a, Ан. П. Чернаков^a, Г. В. Марчий^a, К. О. Николаенко^a, Н. В. Ермаков^a

^a Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^b НИЦ “Курчатовский институт”, ПИЯФ, Ленинградская обл., Гатчина, Россия

^c НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^d ООО “Лазеры и оптические системы”, Санкт-Петербург, Россия

^e АО “Спектрал-Тех”, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: e.mukhin@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 19.03.2022 г.

После доработки 25.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Для диагностики плазмы в диверторной области токамака с реакторными технологиями (TRT) разрабатывается совмещенная диагностика томсоновского рассеяния (ТР) и лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Томсоновское рассеяние и лазерно-индуцированная флуоресценция – лазерные диагностики с возможным объединением зондирующих и собирающих оптических систем, являющихся наиболее сложной и дорогостоящей частью диагностических систем крупных токамаков. Томсоновское рассеяние на свободных электронах – проверенный диагностический метод измерения профилей важных параметров электронного компонента плазмы: электронной температуры T_e и электронной плотности n_e с минимумом модельных предположений. Практически все существующие токамаки снабжены одной или несколькими системами ТР и к настоящему времени накоплен значительный опыт практических методов их реализации. Применение лазерно-индуцированной флуоресценции к измерению параметров ионной и нейтральной компонент плазмы менее распространено, в том числе потому, что требует знания электронных параметров для расчета населенностей возбужденных уровней. Диагностический комплекс, совмещающий использование томсоновского рассеяния и лазерно-индуцированной флуоресценции в диверторной плазме, будет использоваться для одновременного измерения локальных электронных параметров плазмы (T_e , n_e), ионной температуры (T_i) из данных о свечении ионов гелия (HeII) и плотности атомов гелия ($n_a(\text{He})$) и изотопов водорода ($n_a(\text{H}, \text{D}, \text{T})$), – необходимых параметров для базового понимания физики отрыва плазмы от диверторных пластин. Измеренные параметры позволяют рассчитывать скорости ионизации и рекомбинации с использованием T_e , n_e , T_i и $n_a(\text{H}, \text{D}, \text{T})$; силу трения плазменного потока из-за столкновений с нейтральными частицами – T_i , n_i (в предположении $n_i = n_e$) и $n_a(\text{H}, \text{D}, \text{T})$ и давление набегающего потока плазмы – T_e , n_e , T_i и n_i . В статье обсуждаются преимущества совмещения лазерных диагностик плазмы дивертора и пути дальнейшего развития комплекса, основываюсь на опыте создания аналогичных диагностик на отечественных токамаках и для токамака ИТЭР.

Ключевые слова: TRT, томсоновское рассеяние, квазистационарный разряд, дивертор, ЛИФ

DOI: 10.31857/S0367292122100146

1. ВВЕДЕНИЕ

Важной частью экспериментальной программы по разработке токамака с реакторными техно-

логиями станут сценарии разрядов с большими тепловыми потоками через последнюю замкнутую магнитную поверхность. В таких условиях

ограничивающими факторами становятся физические ограничения тепловой нагрузки на первую стенку и элементы дивертора. Дивертор — наиболее энерго-напряженный и потому самый критический элемент любого токамака-реактора. Именно поэтому в проекте TRT необходимо уделять внимание изучению пристеночной плазмы, взаимодействию плазма-стенка, исследованию и контролю рециклинга водорода, контролю режима с полным или частичным отрывом плазмы от дивертора, при котором происходит существенное снижение тепловой нагрузки на пластины дивертора. Высокая плотность мощности дополнительного нагрева в TRT приведет к экстремально высоким тепловым нагрузкам на область дивертора, что увеличит риск серьезной аварии. Программа разработки и исследования диверторных технологий на TRT предполагает реализацию газового дивертора, в котором существенная часть выносимой вдоль сепаратрисы энергии переизлучается внутри дивертора, что должно привести к кардинальному снижению плотности мощности, выделяемой в областях пересечения сепаратрисы с диверторными пластинами. Режимы работы газового дивертора, их оптимизация и отслеживание в процессе работы приобретают особо важное значение для защиты реактора от аварий. Модель пристеночной и диверторной плазмы, а также режима отрыва до конца не разработана. При разработке режимов работы дивертора потребуются надежные экспериментальные данные о распределении электронной, ионной и нейтральных компонент плазмы ($T_e, n_e, T_i, n_i, n_a(\text{He}, \text{H}, \text{D}, \text{T})$), необходимые для подтверждения теоретических моделей и численных кодов [1].

Скорости реакций с участием электронной компоненты T_e, n_e , такие как ионизация, рекомбинация и излучение, играют важную роль в охлаждении плазмы. Параметры ионной компоненты (T_i, n_i) и концентрация нейтральных частиц ($n_a(\text{He}, \text{H}, \text{D}, \text{T})$) важны при оценке скорости ион-нейтральных столкновений, которые:

1. вносят существенный вклад в давление в верхней центральной части дивертора, т.н. “диверторной ноги”;
2. приводят к охлаждению плазмы до температуры около 1 эВ, инициируя усиление рекомбинации;
3. взаимодействие заряженных частиц при их движении в неоднородной плазме приводит к переключению плазменных потоков от свободного течения к диффузионному распространению, делая время пребывания электронов и ионов в этой области достаточным для рекомбинации и охлаждения за счет излучения.

Все три явления — замедление, охлаждение и рекомбинация — важны для эффективного уменьшения теплового потока на стенку диверто-

ра. В случае недостаточного замедления, частицы плазменного потока будут достигать диверторных пластин недостаточно охлажденными, и тепловая энергия, передаваемая диверторным пластинам, может привести к их разрушению.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ В ПРОЕКТЕ TRT

Всю совокупность плазменных параметров в районе X-точки, их изменение от X-точки вдоль сепаратрисы до наружной диверторной мишени и вдоль поверхности наружной диверторной пластины предлагается решать с помощью совмещенной лазерной диагностики ТР/ЛИФ [2]. Одна из наиболее важных задач диагностики будет заключаться в проверке модельных предположений поведения плазмы в диверторе и ее отрыва от диверторных пластин. Акцент на исследовании внешней диверторной ноги объясняется тем, что полный отрыв плазмы обычно начинается на внутренней стороне дивертора, заканчивается на внешней [3], а также сложностью проведения лазерных измерений во внутренней ноге.

Одновременные измерения T_e, n_e, T_i, n_i , и соотношение изотопов водорода дают возможность описать совокупность физических процессов, определяющих работу дивертора, включая:

- Ионизационный баланс и скорости ионизации/рекомбинации ($T_e, n_e, n_a(\text{He}, \text{H}, \text{D}, \text{T})$);
- Потери на излучение ($T_e, n_e, n_i, n_a(\text{He}, \text{H}, \text{D}, \text{T})$);
- Силы трения плазменных потоков (T_i, n_i) о нейтральную компоненту ($n_a(\text{He}, \text{H}, \text{D}, \text{T})$) при известной скорости относительного движения компонент плазмы;
- Давление вдоль наружной ноги дивертора (T_e, n_e, T_i, n_i);
- Изотопное отношение $R_{\text{H/D}} = n_a(\text{H})/n_a(\text{D})$ и $R_{\text{D/T}} = n_a(\text{D})/n_a(\text{T})$.

Цели, стоящие перед совмещенной лазерной диагностикой ТР/ЛИФ, состоят в измерении набора плазменных параметров в соответствии с техническими требованиями, представленными в табл. 1.

Требование к пространственному разрешению диагностики составляет около 30 мм вдоль силовой линии в диверторе, и ~10 мм поперек силовых линий. Требование к временному разрешению квазистационарных процессов в диверторе составляет ~100 мс, и определяется временным масштабом, близким ко времени удержания плазменных частиц в диверторе TRT. Например, быстрые процессы в диверторной плазме ИТЭР [3], соответствующие переходу между режимами L- и H-моды, определяют требование временного разрешения около 10 мс. Чтобы предоставить полезную информацию во время существования

Таблица 1. Технические требования к диагностике ТР /ЛИФ

Параметр	Диапазон	Погрешность
n_e , [м ⁻³]	10 ¹⁹ –10 ²² (в X-точке 10 ²⁰ –10 ²¹)	$\delta n_e < 5\%$
T_e , [эВ]	0.3–100 (в X-точке 100–10 ⁴)	$\delta T_e < 10\%$
T_i , [эВ]	0.3–100 (в X-точке 100–10 ⁴)	$\delta T_i < 20\%$
n_a (H, D, T), [м ⁻³]	>10 ¹⁶	$\delta n_a < 10\%$
R _{H/D} ; R _{D/T}	0.1–10	$\delta R < 20\%$

т.н. локализованной пристеночной моды (ELM), сложная нитевидная структура которой наблюдается во всех современных токамаках (см., например, [4]), необходимая задержка между импульсами томсоновского рассеяния ТР должна быть порядка 10 мкс [5]. Для обеспечения измерений быстрых переходных процессов необходима диагностическая система, регистрирующая данные с частотой в десятки или сотни килогерц. При этом эта диагностическая система должна работать с лазером, функционирующим в режиме ограниченной пачки импульсов. Такая система, возможно, является оптимальным решением для TRT, и подобные системы успешно использовались в работах на нескольких токамаках (см., например, [6, 7]).

3. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА, РАЗМЕЩЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ НА ТОКАМАКЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Оптическая схема систем ТР/ЛИФ построена по классической схеме лазерных диагностик, предполагающей поперечное расположение хорд зондирования и хорд наблюдения рассеянного излучения (рис. 2 и 3). Компоненты оптических систем ввода лазерного излучения располагаются под кассетами дивертора. Лазерная хорда 1, направленная вдоль сепаратрисы наружной диверторной ноги, падает под углом около 5° к поверхности на элемент первой стенки (ПС) в ряду № 1. Лазерная хорда 2 (рис. 3), направленная вдоль поверхности наружной диверторной пластины, заканчивается на задней поверхности загиба элемента ПС № 10. Лазерная хорда 3 (рис. 2) пересекает область пристеночной плазмы (далее стандартно обозначаемой как SOL – scrape-off layer) с наружной стороны от X-точки. Зондирование вдоль хорд 1 и 2 предполагается проводить через щель между диверторными кассетами, а хорды 3 через отверстие в центре кассеты в диверторном порту TRT № 13. Геометрия расположения хорд зондирования 1 и 3 не предполагает применения ловушек лазерного излучения. Ловушку лазерного излучения на хорде 2 можно расположить на задней части элемента ПС № 10. Несколько направлений хорд зондирования предпо-

лагается делать с использованием трех разных лазерных зеркал, защищенных от загрязнений тонкими кварцевыми окнами. Пучки излучения диагностических лазеров диагностик томсоновского рассеяния и ЛИФ, работающие на разных длинах волн, предполагается совмещать с помощью диэлектрических зеркал, отражающих свет в

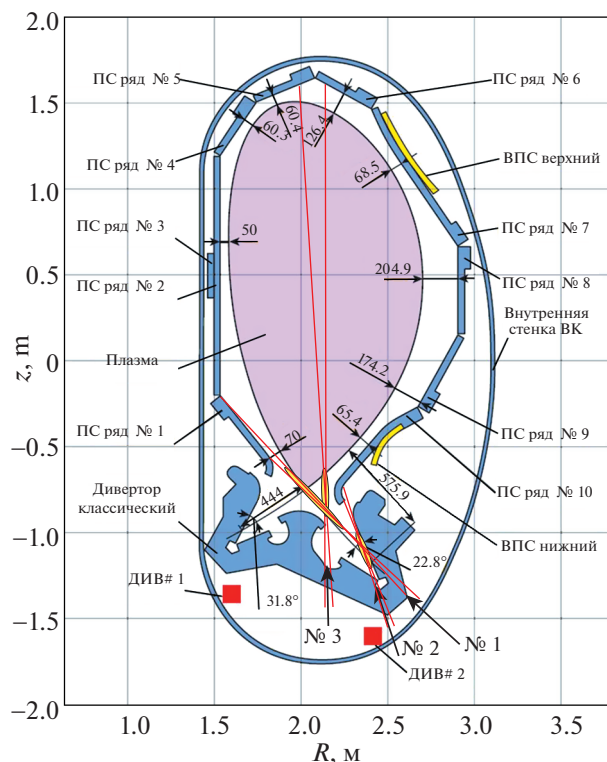


Рис. 1. Стрелками № 1, 2, 3 обозначены направления лазерных лучей по хордам зондирования плазмы в районе X-точки и вдоль поверхности наружной диверторной пластины, совмещенной лазерной диагностики ТР и ЛИФ в диверторном порту № 15. На рисунке указана нумерация рядов элементов первой стенки (ПС) и их расстояние от плазменного шнура. Элементы ПС рядов № 1, № 5, № 6 и № 10 будут подвергаться воздействию лазерного излучения. Сокращения див#1 и див#2 обозначают положение управляющих обмоток, расположенных внутри вакуумного объема и ограничивающих свободное пространство под диверторными кассетами.

узком спектральном диапазоне, и прозрачных на других длинах волн. При этом предполагается, что защитные окна будут очищаться излучением зондирующих лазеров (см., например [8]). Первое лазерное зеркало хорды 3 наиболее удалено от диверторной плазмы, и, следовательно, имеет наиболее защищенное расположение. Телесные углы системы сбора рассеянного излучения хорды 1 и проекция их оптических осей на поперечное сечение приведены на рис. 2.

Диагностика ТР

Пространственное распределение электронной температуры T_e и плотности плазмы n_e вблизи диверторных пластин характеризуется, как правило, большими градиентами, экстремально высокой плотностью (до $2 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$) и низкими значениями температуры (0.3 эВ и несколько больше). По мере отдаления от диверторных пластин и приближения к X-точке, диапазоны изменения n_e и T_e становятся близки к пара-

метрам, характерным для пристеночной плазмы токамака в основной камере. Для плазмы с высокой электронной плотностью и низкой электронной температурой длина Дебая приближается к лазерной длине волны, и отклонение формы спектра ТР от гауссовой становится очень заметным из-за эффекта коллективного рассеяния. Поэтому стандартный алгоритм обработки сигналов ТР с разделением переменных T_e и n_e , справедливый для рассеяния света на свободных электронах, не годится, так как и форма спектра ТР является функцией не только T_e , но и n_e . Влияние коллективных эффектов на дифференциальное

сечение рассеяния лазерного излучения $\frac{d\sigma_\omega}{d\omega d\Phi}$ в режиме ТР учитывается следующими уравнениями [9]:

$$\frac{d\sigma_\omega}{d\omega d\Phi} = \frac{e^4}{m^2 c^4} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{\Gamma_\alpha(x)}{\omega_e} + Z \left(\frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} \right)^2 \frac{\Gamma_\beta(y)}{\omega_i} \right], \quad (1)$$

где

$$\Gamma_\alpha(x) = \frac{\exp(-x^2)}{\left[1 - \alpha^2 \left(2x \int_0^x \exp(t^2 - x^2) dt - 1 \right) \right]^2 + \pi \alpha^4 x^2 \exp(-2x^2)}$$

$x = \Omega/\omega_e; \quad y = \Omega/\omega_i; \quad \Omega = \omega - \omega_0,$

ω и ω_0 – частота рассеянного и падающего излучения;

$$\omega_e = \frac{2\omega}{c} \sqrt{\frac{2T_e}{m}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right); \quad \omega_i = \frac{2\omega}{c} \sqrt{\frac{2T_i}{M}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\alpha = \frac{c}{\omega_0 \sin(\theta/2)} \sqrt{\frac{\pi n_e e^2}{T_e}}; \quad \beta^2 = Z \frac{T_e}{T_i} \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2}$$

c – скорость света в вакууме, T_e, T_i – электронная и ионная температура, Z – заряд иона, n_e – электронная плотность, m и M – масса электрона и иона, e – заряд электрона, θ – угол рассеяния, Φ – телесный угол.

Формы спектров ТР для $T_e = 0.3$ эВ и n_e в диапазоне от 10^{14} м^{-3} до 10^{16} м^{-3} показаны на рис. 4 вместе со спектральными кривыми первых трех спектральных каналов полихроматора. Соответствующие значения параметра Солпитера в этом диапазоне изменения плотности плазмы для диагностики ТР варьируются от 0.25 до 2.54.

Ожидаемые ошибки измерения электронной плотности n_e и температуры T_e для спектров ТР с существенным вкладом коллективных эффектов предлагается оценивать по следующему алгоритму [10]:

а) оценка сигналов ТР в спектральных каналах на основе известных технических параметров с использованием формы спектров ТР, рассчитанной в соответствии с (1);

б) многократное решение (например, 10^3 раз) обратной задачи восстановления T_e и n_e по моделированным сигналам ТР при заданных n_e и T_e с учетом случайных отклонений $\sigma_{N_i} = \sqrt{k(N_i + 2N_{bg\ i}) + 2N_{amp}^2}$, где $k \sim 2.5$ – избыточный шум детектора, N_i и $N_{bg\ i}$ – число фотоэлектронов в полезном сигнале и фоне в i -м спектральном канале, N_{amp} – шум детектора и последующего усиления пересчитанный в количество фотоэлектронов на входе (~ 5 – 10 фотоэлектронов) [11];

в) оценка стандартных отклонений из полученных распределений T_e и n_e .

Диагностика ЛИФ

Применение диагностики лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), использующей свечение высоковозбужденных уровней, предполагает знание n_e и T_e для расчета населенности возбужденных уровней. Особенно критичным

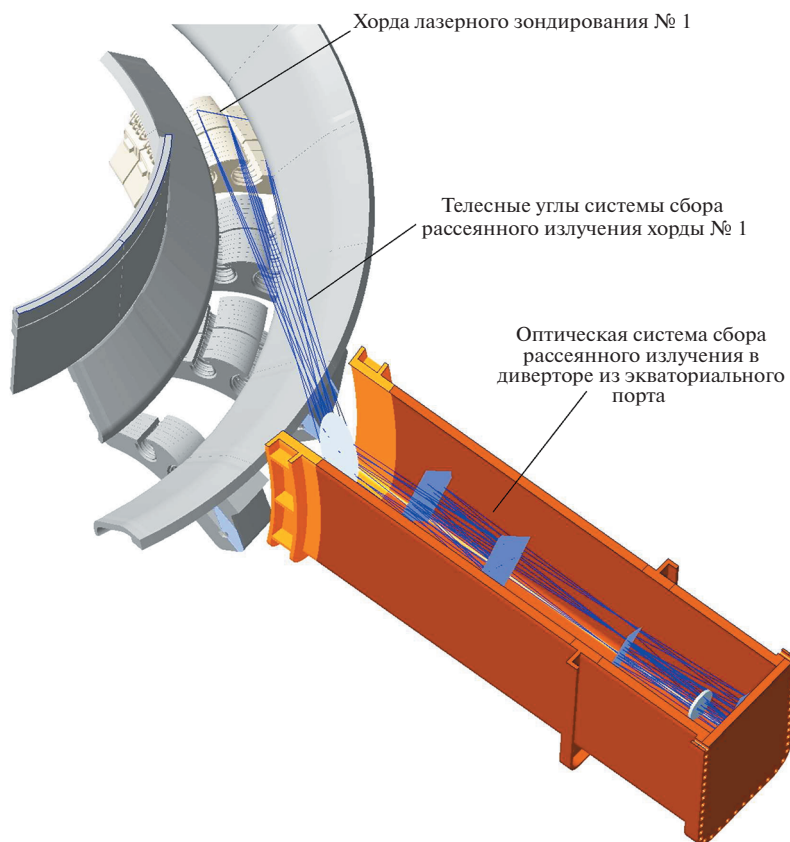


Рис. 2. Телесные углы системы сбора рассеянного излучения лазерной хорды 1. Оптическая система будет использоваться также для сбора рассеянного излучения лазерной хорды 3 (см. рис. 1).

является точность знания параметров электронного компонента для исследуемой области турбулентной диверторной плазмы, отличающейся сильной неоднородностью. В разрабатываемом диагностическом комплексе ЛИФ при совмещении этой диагностики с диагностикой ТР измерения проводятся в одних и тех же точках. Диагностику ЛИФ предполагается использовать для измерений ионной температуры T_i в диверторе по излучению однократно ионизованного иона гелия HeII. Подробное описание метода приведено в [12]. Схема радиационных переходов в атоме гелия, включая пары переходов, которые можно использовать для диагностики, приведены на рис. 5.

Для диагностики свечения однократно ионизованного иона гелия HeII предлагается использовать методику лазерно-индуцированного тушения (ЛИТ) с гашением линии 468.6 нм (переход $n = 4 \rightarrow 3$), наиболее интенсивной в видимом диапазоне (см. рис. 6). Информацию по доплеровской ширине контура линии можно получить при сканировании спектральной линии узкополосным лазером. Для гашения линии 468.6 нм предлагается использовать переход с уровня с наи-

меньшим главным квантовым числом n в переходе $n = 4 \rightarrow 5$ (1012.3 нм), чтобы минимизировать влияние штарковского уширения. Кроме доплеровского уширения в этой методике необходимо учитывать зеемановское и штарковское уширение спектральной линии, влияющие на ширину линии излучения иона гелия.

Другой диагностикой, использующей принцип ЛИТ, является диагностика свечения атомов изотопов водорода. Информация о распределении атомов водорода в пристеночной плазме токамака имеет большое значение. Процесс рециклинга изотопов водорода в первой стенке и пристеночной плазме имеет большое значение при увеличении длительности разряда в токамаке. В частности, диагностика ЛИТ может показать выход на стационар потока водорода со стенки в плазму или эффективность режимов работы стенки токамака-реактора с нулевым рециклингом, обсуждаемым в связи с возможным применением литиевых технологий. Разработка и апробация метода диагностики профиля плотности атомов водорода [2], в отличие от традиционно используемой для таких измерений пассивной спектроскопии, обеспечит возможность измере-

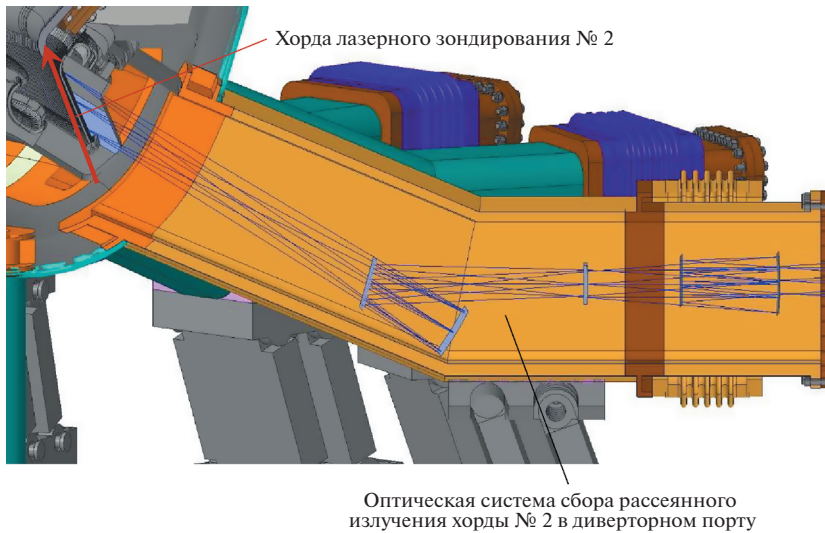


Рис. 3. Телесные углы и зеркальная оптическая система сбора рассеянного излучения хорды 2 расположенная в вакуумном объеме диагностического диверторного порта. Телесные углы прорисованы до границы вакуумного фланца диверторного порта (на рисунке справа).

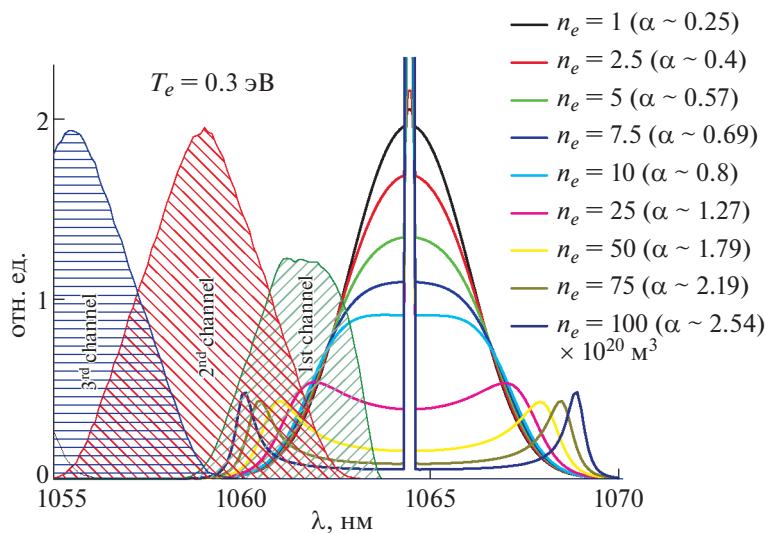


Рис. 4. Формы спектров томсоновского рассеяния для $T_e = 0.3$ эВ и изменения параметра Солпитера α от значения 0.25 при $n_e = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ до 2.54 при $n_e = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Заштрихованными кривыми отмечено спектральное пропускание первых трех спектральных каналов дифракционного полихроматора [5].

ния локальных значений параметров, необходимых для исследования процессов в пристеночной и диверторной плазме токамака. Недавно предложенный метод диагностики атомов изотопов водорода основан на лазерно-индуцированном тушении наиболее интенсивной линии бальмеровской серии протия (H_α), дейтерия (D_α) и трития (T_α) в результате переходов между уровнями с главными квантовыми числами $n = 3 \rightarrow 2$ при лазерном возбуждении с уровня $n = 3$ на один из высележащих ($n \geq 4$). Для гашения линии протия H_α

($\lambda_H = 656.28 \text{ нм}$), дейтерия D_α ($\lambda_D = 656.10 \text{ нм}$) и трития T_α ($\lambda_T = 656.04 \text{ нм}$) с соответствующими разностями в длинах волн $\Delta(\lambda_H - \lambda_D) = 0.18 \text{ нм}$, $\Delta(\lambda_D - \lambda_T) = 0.06 \text{ нм}$ предложено использовать переход $n = 3 \rightarrow 4$ (1875.1 нм). Схема переходов атома водорода представлена на рис. 6.

4. МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ

Одним из технических препятствий реализации оптических диагностик в термоядерных

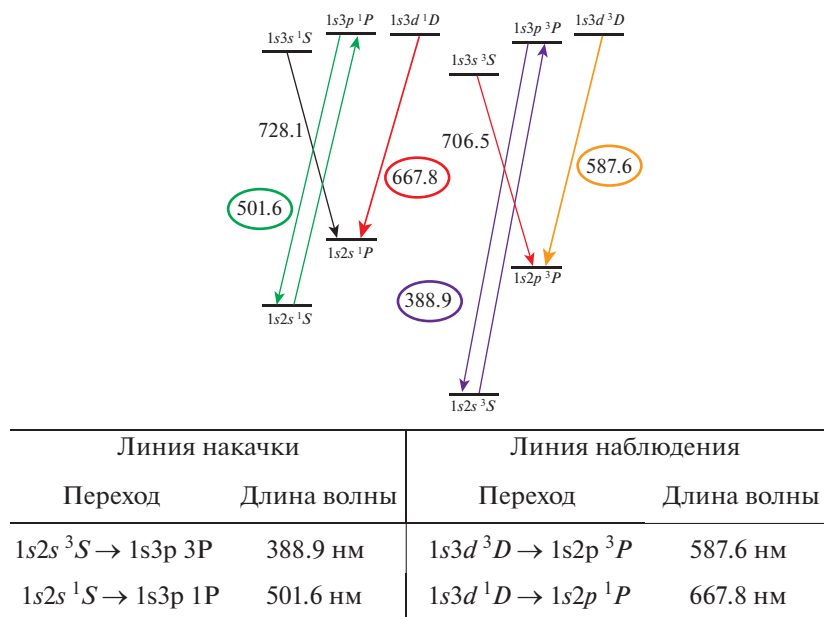


Рис. 5. Схема переходов атома гелия и предлагаемые пары линий, которые можно использовать для измерения концентрации атомарного гелия $n\text{HeI}$ методом ЛИФ.

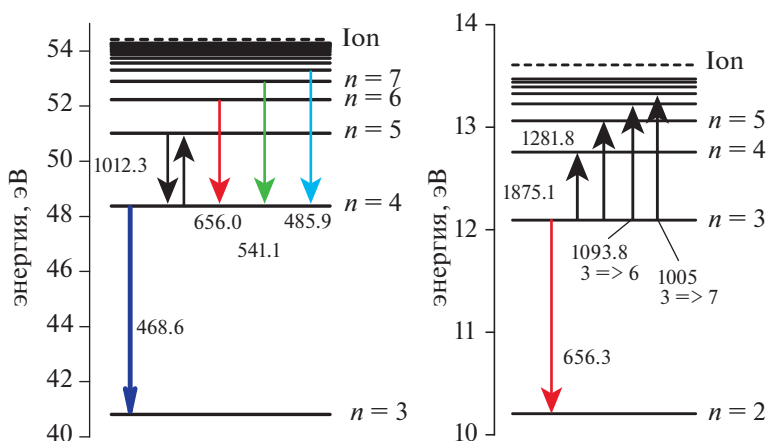


Рис. 6. Схема переходов однократно ионизованного иона гелия (слева) и атома водорода (справа).

реакторах является искажение спектральной характеристики и абсолютного пропускания оптической системы вследствие радиационно-наведенного поглощения и/или загрязнения оптических элементов продуктами эрозии первой стенки. Поскольку режим работы токамака с реакторными технологиями делает затруднительным регулярную калибровку абсолютного пропускания оптических окон (а это влияет на измерение плотности плазмы n_e , концентрации гелия $n_a(\text{He})$ и концентрации изотопов водорода $n_a(\text{H}, \text{D}, \text{T})$) и калибровку искажения их спектрального пропускания (влияет на измерение электронной температуры T_e), достоверность

данных лазерных диагностик диверторной плазмы будет снижаться со временем.

Калибровка спектрального пропускания оптической системы

Для калибровки спектрального пропускания оптической системы предполагается использовать зондирование на нескольких длинах волн [5]. Например, на рис. 7а приведены характеристики пропускания спектральных каналов полихроматора в системе ТР для исследования плазмы с температурой от 0.3 эВ до 300 эВ для случая зондирования на длинах волн 1064 и 1047 нм вблизи

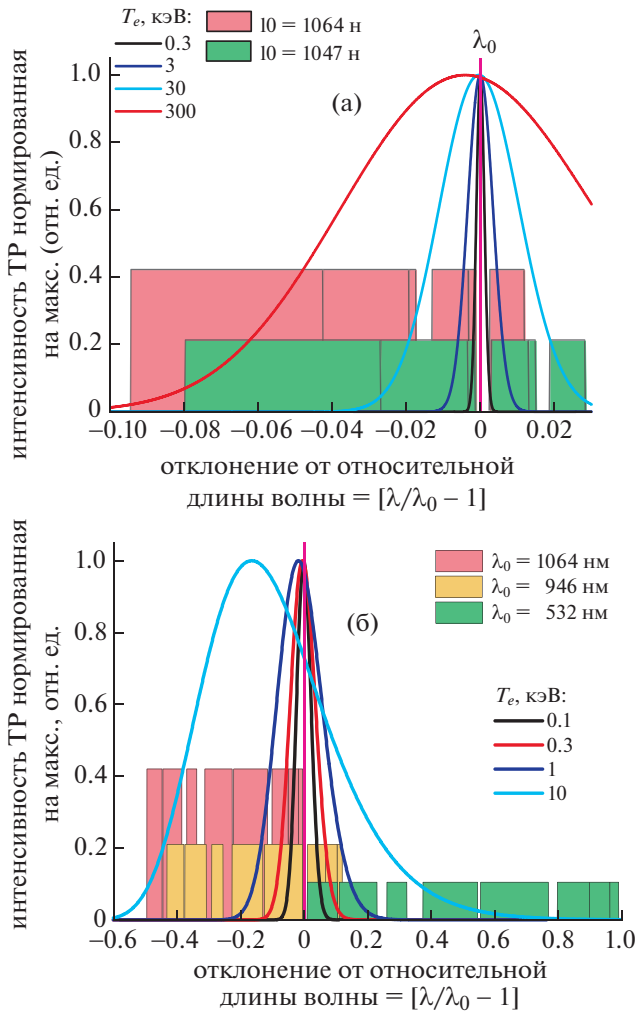


Рис. 7. Расположение кривых пропускания спектральных каналов полихроматора системы ТР и контуры линии томсоновского рассеяния. Пропускание спектральных каналов на разных лазерных длинах волн показано прямоугольниками разной высоты. (а) относительное расположение набора спектральных каналов и томсоновских контуров линий на длинах волн 1064, 1047 нм для электронных температур 0,3, 3, 30 и 300 эВ; (б) относительное расположение набора спектральных каналов и томсоновских контуров линий на длинах волн 1064, 946 и 532 нм для электронных температур 0,1, 1, 10 и 25 кэВ.

диверторной пластины, а на рис. 7б – контуры томсоновского рассеяния для температуры от 100 эВ до 10 кэВ, для длин волн Nd:YAG лазеров 1064, 946 и 532 нм для исследования плазмы в окрестности X-точки.

Калибровка абсолютного пропускания оптической системы

Рутинный подход к проведению абсолютной калибровки пропускания оптической системы лазерных диагностик дивертора требует периоди-

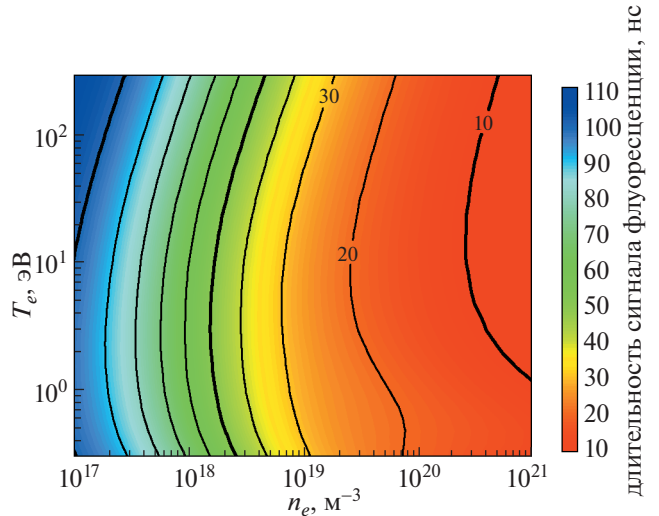


Рис. 8. Длительность сигнала флуоресценции на линии атома гелия HeI 587.6 нм в зависимости от плотности плазмы n_e и электронной температуры T_e при возбуждении лазером на длине волны 388.9 нм при следующих характеристиках лазерного импульса: длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 1 мДж, ширина линии излучения лазера $\Delta\lambda = 50$ пм и сечение лазерного пучка 1 см^2 [2].

ческого напуска газа в вакуумную камеру и калибровки по рамановскому или релеевскому рассеянию. Переход к стационарному режиму горения потребует использования других технологий. Если для центральной плазмы величина n_e может контролироваться путем сравнения профилей плотности со среднехордовыми измерениями при помощи интерферометра, то для измерения n_e в диверторе предлагается использовать анализ формы импульсов флуоресценции атомарного гелия HeI [13]. Например, плотность плазмы n_e надежно измеряется в диапазоне $10^{17} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$ для интервала температуры $T_e = 0.3 - 200 \text{ эВ}$ при возбуждении линии 388.9 нм ($1s2s^3S \rightarrow 1s3p^3P$) импульсным лазером длительностью 10 нс, с энергией 1 мДж и спектральной шириной 1000 пм при поперечном сечении лазерного пучка 1 см^2 (см. рис. 8).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для применения на установке TRT предложен диагностический комплекс для измерения параметров плазмы в диверторе и в области X-точки совмещенной лазерной диагностикой томсоновского рассеяния и лазерно-индуцированной флуоресценции. Измерения предлагается проводить вдоль трех хорд лазерного излучения, вводимого в плазму в диверторном порту TRT № 15. Системы наблюдения при этом предлагается размещать в

диверторном порту № 15 и экваториальном порту № 13. Каждая из хорд лазерного зондирования предназначена для решения своей функциональной задачи: хорда зондирования вдоль наружной диверторной мишени служит для измерения распределения тепловой нагрузки на наружную диверторную пластину, положение и ширину области максимальной нагрузки (strike point); хорда, направленная вдоль сепаратрисы, позволит измерить градиенты параметров электронного, ионного и нейтрального компонентов плазмы от X-точки до области strike point; хорда зондирования, направленная вертикально из-под диверторной кассеты, позволит измерить плазменные параметры в области X-точки на входе в дивертор.

Совокупность параметров, измеряемых совмещенной диагностикой ТР/ЛИФ позволит:

– обеспечить контроль режима работы дивертора, определяя области преимущественной ионизации/рекомбинации в диверторной плазме с помощью измерений локальных значений скоростных коэффициентов ионизации и рекомбинации (T_e, n_e, n_a (He, H, D, T));

– рассчитать силы трения плазменных потоков о нейтральную компоненту (T_i, n_a (He, H, D, T)) при известной скорости относительного движения компонент плазмы;

– рассчитать изменение давления плазменных компонент вдоль наружной ноги дивертора (T_e, n_e, T_i, n_i);

– определить отношение плотностей изотопов водорода $R_{H/D}$ и $R_{D/T}$.

Финансирование. Постановка задач выполняемых диагностикой ТР, а также формулировка технических требований предъявляемых к системе ТР (разд. 1 и 2) выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания 0040-2019-0023. Разработка вариантов размещения диагностики на токамаке, а также постановка задачи анализа ожидаемой точности измерения и подходы к калибровке (разд. 3 и 4) выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания 0034-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krashenninnikov S., Smolyakov A., Kukushkin A.* // On the Edge of Magnetic Fusion Devices. Springer Series in Plasma Science and Technology. 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49594-7>
2. *Mukhin E.E., Kurskiev G.S., Gorbunov A.V., Samsonov D.S., Tolstyakov S.Yu., Razdobarin A.G., Babinov N.A., Bazhenov A.N., Bukreev I.M., Dmitriev A.M., Eleis D.I., Koval A.N., Litvinov A.E., Masyukevich S.V., Senichenkov V.A., Solovej V.A., Tereschenko I.B., Varshavchik L.A., Kukushkin A.S., Khodunov I.A., Levashova M.G., Lisitsa V.S., Vukolov K.Yu., Berik E.B., Chernakov P.V., Chernakov Al.P., Chernakov An.P., Zaitkin P.A., Zhiltsov N.S., Krivoruchko D.D., Skrylev A.V., Mokeev A.N., Andrew P., Kempenaars M., Vayakis G. and Walsh M.J.* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59 086052. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1cd5>
3. *Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C., De Temmerman G., Veselova I., Wiesen S.* // Nucl. Mater. Energy. 2019. V. 20. 100696. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.100696>
4. *Pitts R.A., Andrew P., Arnoux G., Eich T., Fundamenski W., Huber A., Silva C., Tskhakaya D.* // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. 1437–48. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/11/005>
5. *Mukhin E.E., Pitts R.A., Andrew P., Bukreev I.M., Chernakov P.V., Giudicotti L., Huijsmans G., Kochergin M.M., Koval A.N., Kukushkin A.S., Kurskiev G.S., Litvinov A.E., Masyukevich S.V., Pasqualotto R., Razdobarin A.G., Semenov V.V., Tolstyakov S.Yu. and Walsh M.J.* // Nucl. Fusion. 2014. V. 54. 043007. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/4/043007>
6. *Den Hartog D.J., Ambuel J.R., Borchardt M.T., Falkowski A.F., Harris W.S., Holly D.J., Parke E., Reusch J.A., Robl P.E., Stephens H.D., and Yang Y.M.* // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. 10D513. <https://doi.org/10.1063/1.3475723>
7. *Scannell R., Walsh M.J., Carolan P.G., Conway N.J., Darke A.C., Dunstan M.R., and Hare D., Prunty S.L.* // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. 10E510. <https://doi.org/10.1063/1.2237488>
8. *Brown B.W., Gowers C.W., Nielsen P. and Schunke B.* // Rev. Sci. Instr. 1995. V. 66. 3077. <https://doi.org/10.1063/1.1145534>
9. *Evans D. and Katzenstein J.* // Rep. Prog. Phys. 1969 V. 32. 207. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/32/1/305>
10. *Kurskiev G.S., Sdvizhenskii P.A., Bassan M., Andrew P., Bazhenov A.N., Bukreev I.M., Chernakov P.V., Kochergin M.M., Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Mukhin E.E., Razdobarin A.G., Samsonov D.S., Semenov V.V., Tolstyakov S.Yu., Kajita S. and Masyukevich S.V.* // Nucl. Fusion. 2015. V.55. 053024. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/5/053024>
11. *Zhiltsov N.S., Kurskiev G.S., Mukhin E.E., Solovej V.A., Tolstyakov S.Yu., Aleksandrov S.E., Bazhenov A.N., Chernakov Al.P.* // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A. 2020. V. 976. 164289. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164289>
12. *Gorbunov A.V., Mukhin E.E., Berik E.B., Vukolov K.Yu., Lisitsa V.S., Kukushkin A.S., Levashova M.G., Barnsley R., Vayakis G., Walsh M.J.* // Fusion Eng. Des. 2017. V. 123. 695–698. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.129>
13. *Gorbunov A., Shuvaev D.A., Moskalenko I.V.* // Plasma Phys. Rep. 2012. V. 38. 574. <https://doi.org/10.1134/S1063780X12070021>