

УДК 533.9

Д.В. КАЛИНИНА (6 КУРС, КАФ. ФП), С.Ю. ТОЛСТЯКОВ, Н.С. (ФТИ  
ИМ.ИОФФЕ)

## РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М

Новое поколение термоядерных установок — сферические токамаки — обладают малым аспектным отношением, сильной тороидальностью и вытянутостью плазменного шнура, что приводит к значительной пространственной неоднородности параметров плазмы. Применение дополнительных методов нагрева, переходы в режим улучшенного удержания, а также развитие неустойчивостей сопровождаются быстрым изменением параметров плазмы. В этой связи, понимание физики процессов в сферических токамаках требует проведения измерений основных параметров плазмы с высоким пространственным и временным разрешением. Наиболее важные параметры плазмы — плотность и температура электронной компоненты — могут быть измерены адекватно поставленной задаче только с помощью диагностического метода Томсоновского рассеяния (ТР). Этот метод позволяет по интенсивности и спектру рассеянного на электронах лазерного излучения измерять концентрацию и температуру электронной компоненты плазмы. Локальность метода определяется наблюдением рассеянного излучения из малого объема, ограниченного пересечением осей зондирования и наблюдения, а временное разрешение одиночного измерения — длительностью лазерного импульса. Многоимпульсный режим генерации позволяет проводить измерения эволюции параметров плазмы. Основные ограничения по чувствительности связаны с тем, что слабый рассеянный сигнал ( $\sim 10^{-14}$ - $10^{-15}$  от энергии лазерного импульса) наблюдается на фоне собственного свечения плазмы, а также помех от мощного монохроматического излучения на длине волны лазера. В соответствии с задачей измерения параметров электронной компоненты плазмы на токамаке Глобус-М, разработан диагностический комплекс ТР, способный обеспечить не только высокое пространственное и временное разрешение, но также измерения важных для понимания процессов формирования плазмы характеристик пристеночной плазмы с низкими значениями плотности и температуры электронов.

**Принципы построения и размещение диагностики на токамаке Глобус-М.** Сферический токамак Глобус-М — установка с малым аспектным отношением, большой радиус плазмы  $R=0.37$ м, малый радиус  $a=0.25$ м [1]. В камере токамака предусмотрен тангенциальный ввод зондирующего излучения и измерение пространственных распределений электронной температуры и концентрации по большому радиусу в экваториальной плоскости. Система регистрации предполагает измерение в различных пространственных точках, расположенных на оси зондирования с пространственным разрешением 20мм с общей длиной наблюдения более 70% протяженности плазменного шнура вдоль большого радиуса. В качестве рабочего диапазона длин волн была выбрана ближняя ИК область спектра, которая предпочтительна по ряду причин: имеется возможность создания лазеров с высокими энергетическими характеристиками, разработаны и доступны чувствительные приемники излучения, и, наконец, эта область практически свободна от линейчатого излучения примесей в плазме.

**Диагностический лазер.** Для диагностики разработан лазер на неодимовом стекле с длиной волны генерации 1,055мкм, обеспечивающий генерацию до 20 десятиджоулевых импульсов с перестраиваемой задержкой между импульсами от 0.33мс [1]. Задающий генератор с модулированной добротностью и усилитель с неустойчивым резонатором собраны на общем активном элементе прямоугольного сечения 10x28x300мм. Такая компоновка предпочтительна ввиду низкой энергии накачки (3,1кДж) — эффективное

преобразование накачки, и, следовательно, меньшие значения тепловых нагрузок, снижает влияние термооптических деформаций на параметры выходного излучения и обеспечивает жизнеспособность лазера в течение длительного времени. Кроме того, в отличие от традиционных многоэлементных схем, системы питания и коммутации значительно упрощаются. Предварительные испытания лазера подтвердили достоинства схемы — энергия импульса, расходимость и длина волны генерации находились в заданных пределах  $\pm 10\%$ , независимо от энергии накачки.

**Спектральные приборы.** В качестве базовых приборов выбраны отработанные конструкции фильтровых полихроматоров GAPB-1064-4-1K, успешно функционирующие на токамаке DIII-D [2]. Спектральные характеристики интерференционных фильтров скорректированы в соответствии с задачами эксперимента на токамаке Глобус-М. Обладая высокими светосилой и пропусканием, фильтровый прибор характеризуется недостаточным контрастом при малой ширине каналов. Приборы этого типа предполагается использовать для измерения температуры в центральных, наиболее горячих, областях плазмы по широкому спектру рассеянного сигнала. Для измерений в периферийной области плазмы разработан высококонтрастный дифракционный спектрометр с вычитанием неравных дисперсий, что обеспечивает эффективное подавление рассеянного монохроматического излучения.

**Система регистрации.** Для регистрации рассеянных сигналов предложено использовать кремниевые детекторы: фотодиоды (ФД) в сборке с усилителем и лавинные фотодиоды (ЛФД). Оба приемника имеют высокий квантовый выход на длине волны генерации лазера 1,055 мкм  $\sim 40\%$ , увеличивающемся до  $\sim 70\%$  на длине волны 0,9 мкм. Проведенный сравнительный анализ шумовых характеристик систем регистрации на основе ЛФД и ФД дал результат, отличный от устоявшейся точки зрения о безусловном преимуществе приемников с внутренним усилением [3]. Были определены пороговые характеристики ФД и ЛФД (при условии рационального согласования частотных полос сигнала и шума) при наличии фоновой засветки тормозного излучения. При фоновом токе 10 нА (соответствует сигналу от света плазмы в широких спектральных каналах) чувствительности приемников отличались примерно в два раза (при коэффициенте усиления ЛФД  $\sim 30$ ). Расчеты были подтверждены в стендовых экспериментах — приемники ЛФД (Perkin Elmer) и ФД (разработка ФТИ) испытывались при облучении калиброванными световыми потоками, имитирующими рассеянный сигнал и фоновое излучение плазмы. Полоса частот системы регистрации корректировалась стандартным RC-CR формирователем.

**Оценка чувствительности.** На основании характеристик лазерной, спектральной и регистрирующей аппаратуры выполнены расчеты чувствительности диагностики — погрешность измерения локальных значений плотности и температуры электронов в зависимости от температуры. Для диапазона температур (50 эВ–2000 эВ), локальной электронной плотности от  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и средней вдоль хорды наблюдения  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  погрешность измерения плотности электронов составила  $\sim 5\%$ , температуры —  $\sim 10\%$ . Для значений температуры ниже 50 эВ и выше 2000 эВ чувствительность диагностики ухудшалась (в большей мере для низких температур) в связи с плохим заполнением светом спектральных каналов полихроматора.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Bulanin V.V., et al., The Globus-m Diagnostics Design // *Plasma devices and operation* (В печати)
2. Carlstrom, N. et al, Design of the Divertor Thomson Scattering System on DIII-D T<sup>o</sup> // *Rev.Sci.Instr.* 1995.
3. Раздобарин Г.Т.и др., Результаты испытаний кремниевых фотодиодов в экспериментах по Томсоновскому рассеянию на токамаке Туман-3М и в стендовых диагностических экспериментах. (В печати)