

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата физико-математических наук Семенова Игоря Борисовича

на диссертацию **ПУРЫГА Екатерины Александровны**

«Системы регистрации сигналов томсоновского рассеяния в плазменных ловушках

ИЯФ СО РАН»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по

специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

в диссертационный совет Д 003.016.01 на базе

ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Диссертационная работа Е.А. Пурыга посвящена разработке многоканальных систем регистрации сигналов для диагностики томсоновского рассеяния (TP). Эта диагностика является одним из ключевых инструментов экспериментальных исследований по физике высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза (УТС) и позволяет определить параметры плазмы (плотность и температуру) и динамику их поведения во времени. Диагностика TP используется практически на всех экспериментальных термоядерных установках. В частности, на токамаках JET (Калхэм, Великобритания), DIII-D (Сан-Диего, США), Т – 10 (Москва, Россия), Глобус-М (Санкт-Петербург, Россия), стеллараторах W7-X (Грайфсвальд, Германия), LHD (Токи, Япония). Использование этой диагностики предполагается и на международном реакторе ITER, строящемся в настоящее время во Франции. Типичная длительность импульса лазерного излучения составляет 1-20 нс, а энергия лазерного излучения обычно лежит в диапазоне от единиц до несколько десятков джоулей. Для преобразования оптического сигнала в заряд или напряжение используются детекторы и усилители сигналов. Детекторы должны обладать высокой квантовой эффективностью в области спектра рассеянного излучения и высоким быстродействием. Помимо этого, они должны иметь большой амплитудный динамический диапазон, позволяющий работать в широком интервале интенсивности рассеянного излучения, которое пропорционально плотности электронов. На установках с высоким фоновым излучением плазмы, например, на таких как ГОЛ-3 (Новосибирск, Россия), Глобус-М (Санкт-Петербург, Россия), широкий амплитудный диапазон детекторов и измерительных трактов позволяет зафиксировать относительно слабый сигнал рассеяния, наложенный на интенсивную фоновую компоненту, обусловленную линейчатым излучением атомов и ионов примесей, попадающих в плазму со стенок камеры. Для определения температуры плазмы в одной локальной точке необходимо измерить ширину

рассеянной спектральной линии лазера. Практически, это требует фиксации излучения в нескольких спектральных окнах. Что требует использования в диагностике ТР многоканальных измерительных систем. Измерение пространственных распределений плотности и температуры плазмы, приводит к пропорциональному увеличению количества каналов регистрации. Поэтому, в случае данной диагностики, задача создания систем регистрации, обладающих высоким быстродействием и широким амплитудным динамическим диапазоном, с большим количеством синхронных каналов, является особенно **актуальной**.

Научная новизна диссертационной работы Е.А. Пурыга заключается в следующем:

1) На установке ГОЛ-3 (Новосибирск, Россия) при помощи разработанных синхронных многоканальных систем сбора данных были реализованы измерения температуры и плотности электронов по сигналам рассеяния с многократно превышающим их по амплитуде уровнем фонового излучения плазмы. На установке ГДЛ (Новосибирск, Россия) система регистрации ТР впервые обеспечила достоверные измерения электронной температуры ~ 1 кэВ, достигнутой в открытой магнитной ловушке с использованием микроволнового нагрева плазмы. Благодаря высокому соотношению сигнал/шум измерительных каналов системы регистрации точность измерения электронной температуры составила $1\div 10\%$, что сделало возможным экспериментальное исследование различных режимов нагрева плазмы в широком диапазоне изменения плотности электронов;

2) Основой созданных систем сбора данных является двухканальный регистратор формы импульсов ADC12500, работающий с частотой дискретизации до 500 МГц в амплитудном динамическом диапазоне 12 бит. Этот регистратор обладает возможностью программного управления параметрами измерительных трактов (амплитудный диапазон ENOB=11.5, частота дискретизации) и режимами работы (однократный или страничный). Что позволяет интегрировать систему регистрации на его основе в диагностику ТР с импульсно-периодическими лазерами. Так же в регистраторе реализована возможность программной модификации алгоритма обработки данных при помощи загружаемого в ПЛИС (FPGA) цифрового узла конфигурационного файла. Это позволяет использовать его не только в качестве основного элемента измерительного комплекса ТР, но и в других диагностиках: нейтронной, гамма-спектроскопии и регистрации микроволнового излучения плазмы;

3) Создана система регистрации сигналов ТР нового поколения, построенная на основе малошумящих детекторов и быстродействующих регистраторов. Эта система оптимизирована для использования в диагностиках ТР с большим числом

пространственных точек наблюдения, характерных для современных крупномасштабных экспериментов по физике плазмы и УТС. Быстродействующие регистраторы построены на базе матриц емкостных накопителей, реализующих принцип масштабно-временного преобразования. Благодаря калибровочным процедурам удалось обеспечить следующие характеристики измерительных трактов системы регистрации: амплитудный динамический диапазон 10 бит при частоте дискретизации 5 ГГц. Использование решения типа «компьютер на кристалле» с интегрированным в ПЛИС процессором и контроллером Ethernet, позволило создать инновационную систему регистрации сигналов, оптимизированную для размещения на борту спектрометра ТР или аналогичного прибора;

4) В рамках разработки системы сбора данных диагностического комплекса ТР установки ГДЛ были разработаны быстродействующие электронные блоки регистрации (детекторы) излучения ближнего ИК диапазона на основе лавинных фотодиодов и усилителей, обладающие ультразвуковой величиной соотношения сигнал/шум ~ 40 дБ в полосе частот 0 – 50 МГц. В этих детекторах шумовая компонента измеряемого сигнала определяется статистикой фотоэлектронов лавинного фотодиода.

Достоверность результатов исследований и разработок автора диссертации подтверждается их практическим использованием в экспериментальных исследованиях по физике плазмы и УТС на установках ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) ГОЛ-3 и ГДЛ.

В качестве **практической значимости** работы Е.А. Пурыга можно отметить успешную эксплуатацию созданных электронных систем на установках ГДЛ и ГОЛ-3 на протяжении более восьми лет. Созданные системы регистрации диагностики ТР на ГОЛ-3 и ГДЛ позволили получить ценные физические результаты. В частности, система регистрации ТР сделала возможным экспериментальное подтверждение существенного роста электронной температуры плазмы в ГДЛ при инжекции микроволнового излучения. На основе прибора ADC12500, были разработаны регистратор ADC12500PXle, сертифицированный по стандартам ИТЭР и регистратор ADC122000, входящий в состав измерительной системы ТР на установке Глобус-М. Введение в эксплуатацию регистраторов на основе метода масштабно-временного преобразования (SCA), интегрированных в спектрометры модернизированной диагностики ТР установки ГДЛ, позволило реализовать модульную структуру всего комплекса, существенно уменьшить влияние внешних электромагнитных наводок, значительно уменьшить габариты системы регистрации и её стоимость.

В качестве **научной значимости** работы можно выделить вклад в развитие метода высокоскоростной регистрации импульсных сигналов малой амплитуды на основе

принципов прямой оцифровки, а также масштабно-временного преобразования. Разработанные подходы и методики обладают значительной вариативностью и имеют большой потенциал развития. В качестве примера, можно указать концепцию диагностики ТР с лазерным импульсом малой длительности ~1 нс и высокой частотой повторения с пространственной локализацией области наблюдения за счёт времяпролетной задержки импульса (LIDAR). Ярким примером такого подхода является диагностика на токамаке JET. Применение регистраторов на основе SCA, теоретически, способно значительно улучшить амплитудное разрешение и динамические характеристики системы.

Диссертация Е. А. Пурыга состоит из введения, трех глав, заключения, изложена на 132 страницах, включая 75 иллюстраций, и содержит 91 наименование библиографии.

Общая характеристика и содержание работы.

Во **введении** Е.А. Пурыга приводит краткое описание типичных схем диагностического комплекса ТР на плазменных установках, рассматривает используемые на текущий момент методы регистрации сигналов рассеяния для построения измерительной аппаратуры в диагностике ТР, обосновывает актуальность темы диссертации, определяет цели и задачи диссертационной работы, а также формулирует основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются физические принципы, лежащие в основе диагностики ТР. Здесь же рассматриваются основные компоненты диагностических комплексов ТР, эксплуатируемых на действующих физических установках как в России, так и за рубежом. Кратко рассмотрена история развития используемых в диагностике ТР методов регистрации сигналов рассеяния и обсуждены основные технические проблемы, возникающие при их реализации. Проведен сравнительный анализ методов регистрации, базирующихся на процедурах интегрирования сигналов, прямой оцифровке сигналов и регистрации с преобразованием шкалы времени с использованием матриц емкостных накопителей.

Вторая глава посвящена измерительному комплексу, аппаратура регистрации которого построена на основе быстродействующих АЦП. В качестве источника излучения в диагностике ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в ИЯФ СО РАН используется неодимовый лазер с длинной волны 1054 нм. С его помощью на установке ГОЛ-3 генерируется импульс лазерного излучения с энергией до 10 Дж и длительностью 20 нс, а на установке ГДЛ, импульс с энергией до 20 Дж при длительности 50 нс. Измерительный комплекс диагностики имеет модульную архитектуру и строится на основе восьмиканальных измерительных подсистем, включающих в свой состав фотоприёмники, двухканальные регистраторы (ADC12500), модули синхронизации и адаптер канала связи Ethernet/UART.

Фотоприёмники, построенные на основе лавинных фотодиодов, имеют рабочую полосу частот сигнала от 0 до 50 МГц. Адаптер канала связи Ethernet/UART обеспечивает связь фотоприемников с сервером диагностики. Регистраторы ADC12500, фиксируют текущие амплитудные значения сигналов рассеяния длительностью ~20-50 нс с частотой дискретизации до 500 МГц при амплитудном разрешении 12 бит и накапливают результаты измерений в буферном запоминающем устройстве (БЗУ) объемом 2 Мбайт. Модуль синхронизации обеспечивает прием и размножение внешнего импульса запуска, а также генерацию опорных синхросигналов, формирующих временную шкалу регистраторов ADC12500.

В третьей главе рассматривается система регистрации диагностики ТР, построенная на основе принципа масштабно-временного преобразования. Основой системы регистрации стали девятikanальные кристаллы матриц емкостных накопителей DRS4, содержащие в каждом канале по 1024 ячейки выборки и хранения. Этот кристалл позволяет фиксировать текущие амплитудные значения сигналов рассеяния с временной дискретностью 200 пс в 11-разрядном амплитудном динамическом диапазоне. Неизбежным следствием выбранного принципа регистрации, является необходимость проведения дополнительных процедур калибровки ячеек матрицы емкостных накопителей, что несколько усложняет их использование. В этой главе так же приводится детальное рассмотрение этих процедур. В качестве источника излучения на модернизированной диагностике ТР на установке ГДЛ используется неодимовый лазер с длиной волны 1064 нм, Энергия в импульсе составляет 1.7 Дж, а его длительность 10 нс. Оптическая система сбора света рассчитана на измерение температуры и плотности электронов в шести точках в плазме, расположенных вдоль лазерного пучка. Она имеет модульную архитектуру, в которой каждой пространственной точке соответствует отдельный спектральный прибор (спектрометр). Спектрометр содержит шесть спектральных каналов, использующих в качестве детекторов излучения лавинные фотодиоды. Седьмой, вспомогательный канал служит для регистрации энергии лазерного импульса. Сигнал этого канала формируется *pin* диодом, установленным на оптической плате лазера. Он используется для измерения энергии в импульсе, необходимой для вычисления плотности электронов. Связь системы регистрации с сервером диагностики осуществляется посредством интерфейса Ethernet 10/100/1000.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

- 1) На рисунке 3.28 Главы 3.3 приведены сигналы рассеяния на установке ГДЛ, полученные с помощью системы регистрации на основе кристалла DRS4. Сигналы имеют временной сдвиг. Необходимо разъяснение этого явления на рисунке 3.4, приводящего конструкцию спектрометра без геометрических размеров прибора. Остается неясным, является это следствием неправильной работы системы синхронизации или эта задержка связана с прохождением светового импульса между лавинными фотодиодами в геометрии спектрографа.
- 2) По итогам двух глав, описывающих разработанные системы сбора данных для диагностики ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ, основанные на разных методах регистрации, не хватает дополнительного раздела описывающего сравнительную характеристику двух этих систем, и указывающую на их достоинства и недостатки.
- 3) В заключении диссертации указывается, что разработанные регистраторы ADC12500 также используются и в других диагностах, но в самом тексте диссертации об этом нет упоминаний (как и при каких условиях). Как минимум раз об этом идет речь в заключениях (Главы 2 и общем Заключении), необходимо было уделить этому пару абзацев при описании самих регистраторов в Главе 2.
- 4) Кроме того, диссертационная работа не лишена стилистических ошибок, например, введя один раз сокращение томсоновского рассеяния, как ТР, его и следовало везде использовать, но довольно часто встречается его полное наименование. В списке литературы также допущены небрежности, в некоторых пунктах фамилия авторов идет перед инициалами, у других после.

Автореферат диссертации Е. А. Пурыга оформлен в соответствии с требованиями ВАК, написан четким и понятным языком. Он дает достаточно полное представление о содержании диссертации, содержит необходимые формулировки цели и задач исследования, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической значимости. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Однако он также не лишен стилистических **замечаний**, например:

- 1) На странице 11 указывается, что объем ЗУ регистраторов составляет 2 Мб, хотя ранее везде указывалось 3 Мб;
- 2) На странице 17, частота дискретизации регистраторов ADC12500 указана как 500 ГГц, хотя она составляет 500 МГц.

Представляемая работа прошла серьезную апробацию, ее основные результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано 19 научных работ (из них 7 — статьи в

рекомендованных ВАК журналах и 12 — статьи в трудах международных и всероссийских конференций).

Необходимо отметить, что **личный вклад** Е.А. Пурыга в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим.

Сделанные в отзыве замечания не сказываются на качестве проведенного исследования и не вносят принципиальных изменений в положения и выводы, выносимые автором на защиту. В целом диссертация Е.А. Пурыга представляет собой понятную и хорошо оформленную работу. Текст диссертации содержит необходимые иллюстрации и написан профессиональным языком.

Все это позволяет утверждать, что представленная диссертационная работа Е.А. Пурыга является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики и критериям, установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». Автор диссертации, Пурыга Екатерина Александровна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Кандидат физ.-мат. наук
начальник сектора
Частного учреждения
Государственной корпорации
по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР»
123182, Москва,
площадь ак. Курчатова 1, строение 3
I.Semenov@iterrf.ru

Подпись И.Б. Семенова заверяю
Учёный секретарь:
Ученая степень секретаря:
Электронный адрес:
Дата:

И.Б. Семенов



А.Н. Мокеев

Кандидат физ.-мат. наук
a.mokeev@iterrf.ru

8 сентября 2020 г.