

На правах рукописи



ПУРЫГА Екатерина Александровна

**СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ТОМСОНОВСКОГО
РАСSEЯНИЯ В ПЛАЗМЕННЫХ ЛОВУШКАХ ИЯФ СО РАН**

**01.04.01 – Приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

НОВОСИБИРСК – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ХИЛЬЧЕНКО –
Александр Дмитриевич

доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ГУСЕВ – Василий
Константинович

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, главный научный сотрудник.

СЕМЕНОВ –
Игорь Борисович

кандидат физико-математических наук,
Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, начальник отдела.

ВЕДУЩАЯ –
ОРГАНИЗАЦИЯ

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «__9__» октября_2020 г. в «__10__» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте http://inp.nsk.su/images/diss/Puryga_disser.pdf.

Автореферат разослан
«_23_» июля_2020 г.
Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Диагностика томсоновского рассеяния (ТР) является одним из ключевых инструментов экспериментальных исследований по физике высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза (УТС). Эта диагностика позволяет определить параметры плазмы (плотность и температуру) и динамику их поведения во времени. В её основу положена методика регистрации интенсивности и спектрального состава излучения, рассеянного на свободных электронах. Она используется практически на всех экспериментальных термоядерных установках. В частности, на токамаках JET (Калхэм, Великобритания), DIII-D (Сан-Диего, США), T – 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.

В качестве источника излучения в диагностике ТР используются импульсные лазеры с длиной волны от УФ (~200 нм) до ближнего ИК (~1000 нм) диапазона. При этом типичная длительность импульса 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, 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. Форма спектра нерелятивистского некогерентного томсоновского рассеяния описывается гауссовой кривой с центром на длине волны лазера и шириной, пропорциональной $\sqrt{T_e}$. Для определения температуры плазмы в одной локальной точке необходимо измерить ширину спектра. Практически, это требует его фиксации в нескольких спектральных окнах. Как правило, используется от четырёх до шести спектральных каналов, что предопределяет использование в диагностике ТР многоканальных измерительных систем. Измерение пространственных распределений плотности и температуры плазмы по нескольким точкам, приводит к пропорциональному увеличению количества каналов регистрации. К примеру, если спектрометр ТР имеет шесть спектральных каналов, то для измерения пространственного профиля температуры и плотности электронов по десяти точкам, требуется 60 каналов системы регистрации. На крупных современных

токамаках и стеллараторах диагностика ТР для центральной области плазменного шнура имеет порядка 50 точек. Поэтому, в случае данной диагностики, задача создания систем регистрации с большим количеством синхронных каналов является особенно актуальной.

Методология и методы исследования

Для построения систем регистрации ТР можно выделить несколько основных принципов. Исторически, первым начал использоваться метод, основанный на интегрировании сигнала детектора по времени и последующей его оцифровке. При этом максимальная частота повторения последовательности накопления и оцифровки сигнала ограничивает сверху допустимую максимальную частоту следования лазерных импульсов. В данном методе могут применяться АЦП с относительно небольшой частотой дискретизации (несколько МГц) и расширенным амплитудным динамическим диапазоном (14-16 бит). Аналогичный метод регистрации энергии сигналов малой длительности широко использовался и используется до сих пор в физике высоких энергий. Он хорошо отработан и апробирован на разных детекторах, что и стало его неоспоримым преимуществом при разработке регистрирующей аппаратуры для диагностики ТР. Главным преимуществом метода интегрирования сигнала, является увеличение соотношения сигнала к шуму за счёт уменьшения полосы частот, в котором происходит регистрация того и другого. Современные измерительные системы на практике демонстрируют соотношение сигнала к шуму, весьма близкое к теоретическому пределу \sqrt{N} , где N – полное количество фотоэлектронов в импульсе рассеяния. В диагностиках ТР метод интегрирования широко используется на установках с малым уровнем собственного излучения плазмы. В частности, на токамаках SST-1, HT-7A, DIII-D. На основе метода интегрирования может быть построена многоканальная система регистрации, отличающиеся сравнительно низкой стоимостью за канал.

Недостатком метода интегрирования является невозможность отделения сигнала рассеяния от сигнала фонового излучения плазмы в одном измерении. Требуется минимум два измерения с интегрированием по времени, одно из которых содержит импульс рассеяния. Поэтому необходимым условием является постоянство фона в течение этих измерений. При этом метод интегрирования не предоставляет индикатора, по которому результаты должны быть отброшены в случае нарушения данного условия. Полная информация может быть предоставлена осциллограммой сигнала, зафиксированной в достаточной полосе частот с соответствующей частотой дискретизации. По мере развития микроэлектроники появились кристаллы АЦП с частотой дискретизации выше 100 МГц с динамическим диапазоном 10 бит и более. Это позволило использовать для регистрации сигналов рассеяния методику, основанную на прямой оцифровке их текущих амплитудных значений во всех спектральных окнах. Она позволяет регистрировать форму сигналов малой длительности в широком диапазоне изменения их амплитудных значений или контрастности импульса рассеяния по отношению

к уровню фонового излучения плазмы. При этом может быть решена задача отделения сигнала рассеяния и фона. В качестве примеров измерений ТР с относительно высоким уровнем фонового излучения плазмы можно привести Глобус-М, ГОЛ-3, W-7X, ASDEX и некоторые другие.

Наиболее существенным недостатком описанной методики является высокая стоимость его аппаратных средств и высокие уровни потребления электроэнергии и тепловыделения. Поэтому оправданным и актуальным является поиск альтернативного метода высокоскоростной фиксации формы импульса, свободного от упомянутых недостатков. Наиболее привлекательной является методика масштабного-временного преобразования сигналов, основанная на фиксации их текущих амплитудных значений в аналоговой форме большим количеством элементарных ячеек выборки и хранения (матрицы емкостных накопителей), и последующей их оцифровке относительно медленным АЦП. Её применение долгое время сдерживалось отсутствием необходимой микроэлектронной элементной базы. Ситуация менялась с появлением SCA (switch capacitor array) технологии, в рамках развития которой были разработаны кристаллы, содержащие тысячи ячеек выборки и хранения. В качестве примера можно привести кристаллы DRS, PSEC, NECTAR, TARGET, разработанные в различных зарубежных учреждениях: PSI (Швейцария), EFI (США), IRFU (Франция), University of Hawai'i at Manoa (США). Регистраторы, построенные на базе таких кристаллов, имеют более низкую стоимость по сравнению с регистраторами на базе быстродействующих АЦП, большее количество измерительных трактов и соизмеримые или лучшие амплитудно-частотные характеристики. Они позволяют вести оцифровку сигналов с частотой дискретизации до нескольких десятков гигагерц, но на ограниченной временной базе, определяемой количеством ячеек матриц емкостных накопителей. Регистраторы на основе такой методики преобразования сигналов широко используются в физике высоких энергий на таких детекторах, как ATLAS, MEGII, BELLEII.

Цель работы

Целью диссертационной работы является создание систем регистрации диагностики томсоновского рассеяния для экспериментов по физике плазмы и УТС в установках ГОЛ-3 и ГДЛ. В рамках диссертационной работы, были решены следующие основные задачи:

- Разработка системы регистрации для диагностических комплексов ТР установок ГОЛ-3 и ГДЛ, позволяющей фиксировать форму исследуемых сигналов длительностью 10-50 нс при наличии яркого фонового излучения плазмы в рабочем спектральном диапазоне;
- Разработка системы регистрации для модернизированного диагностического комплекса ТР установки ГДЛ с шестью линиями наблюдения для измерения динамики радиального профиля температуры и плотности электронной компоненты плазмы. Система

обеспечивает регистрацию сигнала рассеяния длительностью около 10 нс с частотой повторения до 10 Гц.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Им были предложены структурные решения, положенные в основу описанных систем регистрации. Автор занимался аппаратной разработкой большинства элементов систем регистрации томсоновского рассеяния. А именно: семейства детекторов на основе лавинного фотодиода, регистратора ADC12500, системы синхронизации, высокоскоростного регистратора сигнала на основе матриц емкостных накопителей и дополнительного модуля регистрации для измерения фонового излучения плазмы.

Для регистратора ADC12500, модуля таймера, входящего в состав системы синхронизации, регистратора на основе матриц емкостных накопителей автором были лично реализованы алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС), выполняемые на базовых логических элементах ПЛИС.

Автор лично занимался тестированием, отладкой и вводом в эксплуатацию всех элементов систем регистрации.

Научная новизна

- Разработанные синхронные многоканальные системы сбора данных для диагностических комплексов томсоновского рассеяния на основе быстродействующих регистраторов формы импульсов ADC12500 были введены в эксплуатацию на линейных ловушках с магнитным удержанием плазмы: ГОЛ-3 и ГДЛ в ИЯФ СО РАН. Данные измерений, полученные при их помощи, впервые сделали возможными ряд исследований. На ГОЛ-3 были реализованы измерения температуры и плотности электронов по сигналам рассеяния с многократно превышающим их по амплитуде уровнем фонового излучения плазмы. На ГДЛ система регистрации томсоновского рассеяния 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÷10%, что сделало возможным экспериментальное исследование различных режимов нагрева плазмы в широком диапазоне изменения плотности электронов;
- Основой созданных систем сбора данных является двухканальный регистратор формы импульсов ADC12500, работающий с частотой дискретизации до 500 МГц в амплитудном динамическом диапазоне 12 бит. Его уникальными особенностями являются возможность программного управления параметрами измерительных трактов (амплитудный диапазон, частота дискретизации) и режимами работы (однократный или страничный). Последнее обстоятельство позволяет интегрировать систему регистрации в диагностику томсоновского

рассеяния с импульсно-периодическими лазерами. Так же в регистраторе реализована возможность программной модификации алгоритма обработки данных при помощи загружаемого в ПЛИС цифрового узла конфигурационного файла. Это позволило использовать его не только в качестве основного элемента измерительного комплекса томсоновского рассеяния, но и в других диагностиках: нейтронной, гамма-спектроскопии и регистрации микроволнового излучения плазмы;

- Создана система регистрации сигналов томсоновского рассеяния нового поколения, включающая в свой состав: малошумящие детекторы на основе лавинных фотодиодов, быстродействующие регистраторы для фиксации высокочастотной (ВЧ) компоненты рассеянного сигнала и восьмиканальные регистраторы для фиксации низкочастотной (НЧ) фоновой компоненты. Система регистрации оптимизирована для использования в диагностиках томсоновского рассеяния 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. Регистраторы этого типа фиксируют текущие амплитудные значения рассеянного сигнала в аналоговой форме большим количеством элементарных ячеек выборки и хранения (матриц емкостных накопителей), и последующей оцифровки с помощью АЦП, работающего в мегагерцовом диапазоне. Использование ПЛИС большой ёмкости со встроенным процессором для построения цифрового узла регистратора позволило перенести на программный уровень проведение ресурсоёмких калибровочных процедур, направленных на улучшение метрологических характеристик прибора. Применение ПЛИС позволило выполнять предварительную обработку данных на уровне системы регистрации и существенно сократить объем данных, передаваемый в диагностический сервер. 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 томсоновского рассеяния или аналогичного прибора;
- В рамках разработки системы сбора данных диагностического комплекса томсоновского рассеяния установки ГДЛ были разработаны быстродействующие детекторы излучения ближнего ИК диапазона на основе лавинных фотодиодов и усилителей, обладающие ультранизкой величиной соотношения сигнал/шум ~ 40 Дб в полосе частот 0 – 50 МГц.

В этих детекторах шумовая компонента измеряемого сигнала определяется статистикой фотоэлектронов лавинного фотодиода.

Теоретическая и практическая значимость работы

Практическая значимость работы характеризуется успешным опытом эксплуатации созданных электронных систем на установках ГДЛ и ГОЛ-3 на протяжении более восьми лет. Созданные системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния 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 ADC12500PXIe, сертифицированный по стандартам ИТЭР и регистратор ADC122000, входящий в состав измерительной системы томсоновского рассеяния на установке Глобус-М. Введение в эксплуатацию регистраторов на основе метода масштабного-временного преобразования (SCA), интегрированных в спектрометры модернизированной диагностики томсоновского рассеяния установки ГДЛ, позволило реализовать модульную структуру всего комплекса, существенно уменьшить влияние внешних электромагнитных наводок, значительно уменьшить габариты системы регистрации и её стоимость.

Теоретической значимостью работы, в первую очередь, является вклад в развитие метода высокоскоростной регистрации импульсных сигналов малой амплитуды на основе принципов прямой оцифровки, а также масштабного-временного преобразования. Проведён сравнительный анализ технологий и решений в области микроэлектроники, актуальных на сегодняшний день для решения этой задачи. Разработанные подходы и методики обладают значительной вариативностью и имеют большой потенциал развития. В качестве примера, можно указать концепцию диагностики томсоновского рассеяния 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Система регистрации диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ, построенная на основе восьмиканальных измерительных модулей АЦП прямого преобразования с амплитудным динамическим диапазоном 12 бит и частотой дискретизации до 500 МГц. Система позволяет фиксировать форму импульса рассеянного излучения длительностью 20-50 нс на фоне излучения плазмы в 2-3 раза, превышающего по амплитуде полезный сигнал;

- Регистратор формы импульса ADC12500 с программной конфигурацией алгоритма обработки данных, позволяющей его широкое применение в диагностических комплексах физических установок;
- Система регистрации модернизированной диагностики томсоновского рассеяния ГДЛ, состоящая из шести восьмиканальных измерительных модулей АЦП с амплитудным динамическим диапазоном 10 бит и частотой дискретизации до 5 ГГц. Измерительные модули АЦП построены на базе матриц емкостных накопителей, реализующих принцип масштабно-временного преобразования. Система позволяет фиксировать форму импульса длительностью около 10 нс при частоте следования измерений до 10 Гц.

Апробация диссертации

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на всероссийской научной конференции студентов – физиков ВНКСФ – 16 (Волгоград, 2010), 14-й, 16-й, 17-й и 18-й Всероссийских конференциях «Диагностика высокотемпературной плазмы» (г. Звенигород, 2011, 2015, 2017 и с. Красная Пахра, 2019), на международных симпозиумах по ядерной физике (г. Анахайм, США, 2012; г. Страсбург, Франция, 2016; г. Сидней, Австралия, 2018), на международной конференции по технологии и приборостроению в физике частиц (г. Амстердам, Голландия, 2014), на международной конференции по системам, работающим в режиме реального времени (г. Нара, Япония, 2014). Результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

Структура работы

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено краткое описание типичных схем диагностического комплекса ТР на плазменных установках, рассмотрены используемые на текущий момент методы регистрации сигналов рассеяния для построения измерительной аппаратуры в диагностике ТР, обоснована актуальность темы диссертации, определена цель, сформулированы задачи и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются физические принципы, лежащие в основе диагностики ТР [1]. Здесь же рассматриваются ключевые составляющие 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. Указаны возможные пути их решения. В частности, позволяющие компенсировать влияние паразитной емкости ЛФД на шумовые характеристики аналогового тракта. Рассмотрена история создания систем регистрации для диагностики ТР. Проведен сравнительный анализ методов регистрации, базирующихся на процедурах интегрирования сигналов, прямой оцифровке сигналов и регистрации с преобразованием шкалы времени с использованием матриц емкостных накопителей. Указаны их преимущества, недостатки и условия применения в физическом эксперименте.

Вторая глава посвящена измерительным комплексам диагностики ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ, аппаратура регистрации которых построена на основе быстродействующих АЦП. На момент разработки этих комплексов в ИЯФ СО РАН уже имелась хорошая приборная база и была также отработана методика построения на основе прямого преобразования многоканальных синхронных измерительных систем.

В качестве источника излучения в диагностике ТР на установках ГОЛ-3 [2] и ГДЛ [3] ИЯФ СО РАН используется неодимовый лазер с длиной 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 со встроенным трансимпедансным усилителем, имеют рабочую полосу частот сигнала от 0 до 50 МГц. Функциональная схема которых приведена на рисунке 1.

Фотоприёмник включает в себя два сигнальных тракта – высокочастотный (ВЧ) и низкочастотный (НЧ). Сигнал с выхода лавинного фотодиода поступает на ВЧ тракт через дифференцирующую RC цепочку, отсекающую паразитную фоновую компоненту. Это позволяет регистрировать сигналы рассеяния с

помощью быстродействующих АЦП относительно небольшой разрядности (10-12 бит). НЧ тракт используется для фиксации фоновой компоненты, обусловленной собственным свечением плазмы, медленными АЦП. Поскольку амплитуда этой компоненты на установке ГОЛ-3 может существенно превышать амплитуду сигнала рассеяния, то коэффициент усиления НЧ тракта был выбран равным единице.

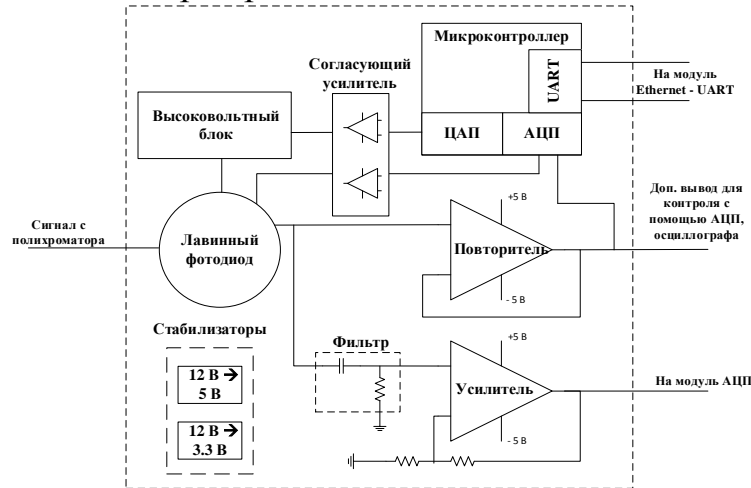


Рисунок 1. Функциональная схема фотоприёмника

Для формирования напряжения смещения лавинного фотодиода используется управляемый электрическим сигналом DC-DC преобразователь.

Помимо усилителей и DC-DC преобразователя в состав фотодетектора включен управляющий узел на основе микроконтроллера со встроенными АЦП, ЦАП и последовательным каналом связи UART, обеспечивающим взаимодействие с консолью оператора.

Для обеспечения связи модулей фотоприемников с сервером диагностики используется адаптер канала связи Ethernet/UART.

Для фиксации выходных сигналов фотоприемников диагностики ТР были специально разработаны двухканальные регистраторы ADC12500. Они 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. Функциональная схема регистратора приведена на рисунке 2, он включает в свой состав:

- Усилители ПУ1 и ПУ2 с программно изменяемым коэффициентом усиления входных сигналов, что дает возможность приема сигналов различной амплитуды в диапазоне от 2.5 В до 20 В;
- Второй каскад усиления на основе усилителей СУ1 и СУ2, согласующих сигналы с выхода усилителей ПУ1 и ПУ2 со шкалой преобразования АЦП;
- Широкополосные АЦП1 и АЦП2 с частотой дискретизации 500 МГц и разрядностью 12 бит, которые обеспечивают преобразование

- сигнала в цифровую форму и реализацию метода регистрации данных на основе прямого преобразования;
- Узел синхронизации и таймирования, позволяющий уменьшить значение апертурной неопределённости до 1 пс и обеспечивающий прием импульсов запуска и синхронизации;
 - Узел А4, построенный на основе 2х-канального ЦАП для смещения уровня нуля входного сигнала;
 - ПЛИС Cyclone III, на основе которой построен цифровой узел регистратора, который выполняет следующие функции: принимает данные от кристаллов АЦП с заданным темпом, загружает опорные константы в регистры управления ЦАП и кристалла ГУН с петлей ФАПЧ, выполняет процедуры предварительной обработки данных, считывает накопленные в буферном ЗУ данные и передает их по каналу связи Ethernet консольному компьютеру;
 - Внешнее буферное ЗУ емкостью 1048576 (1М) 36-разрядных слов с предельной частотой записи 250 МГц, в котором фиксируются отсчёты каждого кристалла АЦП;
 - Загрузчик, построенный на основе энергонезависимой ПЛИС МАХ3000А, обеспечивает загрузку конфигурационного файла в ПЛИС.

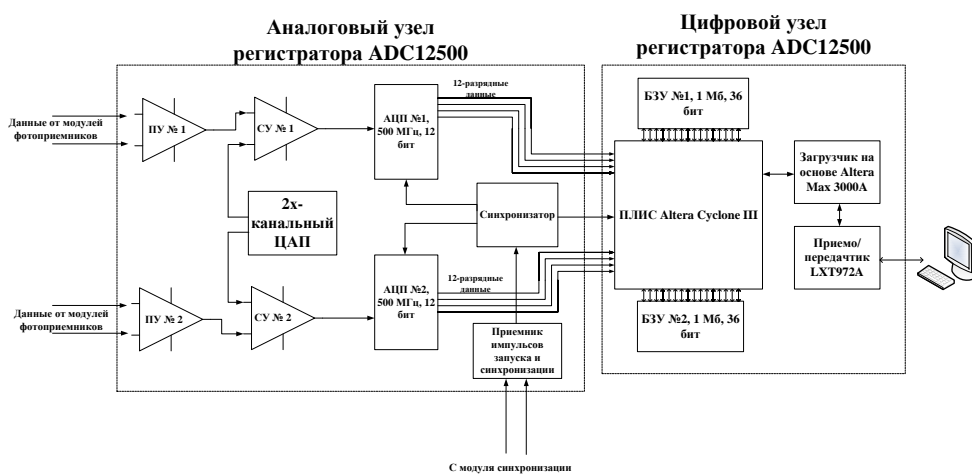


Рисунок 2. Функциональная схема модуля регистрации, где ПУ – усилитель с программируемо изменяемым коэффициентом передачи; СУ – согласующий усилитель, обеспечивающий преобразование однополярного сигнала в дифференциальный; БЗУ – буферное запоминающее устройство.

Измерительный комплекс построен на основе отдельных измерительных подсистем. Ключевым элементом комплекса является система синхронизации, обеспечивающая формирование единой временной шкалы для регистраторов всех подсистем. Система синхронизации имеет иерархическую структуру и содержит два вида модулей: таймера и синхронизации. Таймер выполняет функции ведущего модуля системы (Рисунок 3). Он отвечает за формирование опорного синхросигнала, задающего частоту дискретизации регистраторов

измерительных подсистем, за прием внешнего импульса запуска и его привязку к опорному синхросигналу. Модуль синхронизации, входящий в состав каждой измерительной подсистемы, ретранслирует сигналы запуска и опорный синхросигнал, формируемый таймером, регистраторам ADC12500.

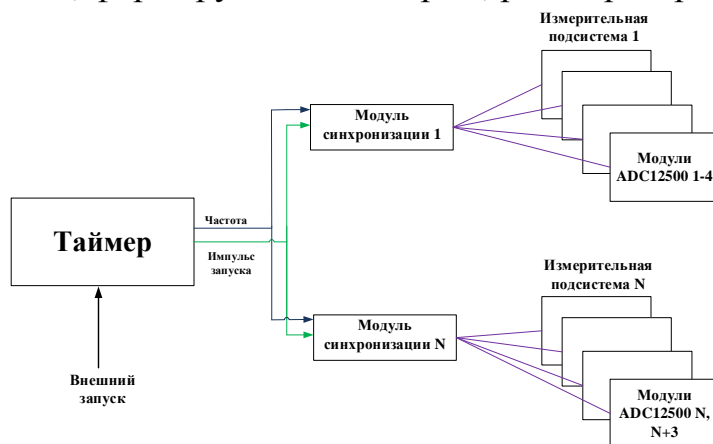


Рисунок 3. Структурная схема системы синхронизации

На рисунке 4 а, б приведены характерные осциллограммы НЧ и ВЧ компонент сигнала рассеянного излучения в одном из спектральных окон. Цифрой «1» отмечен сигнал рассеянного излучения, цифрой «2» сигнал динамической калибровки, а цифрой «3» фоновая составляющая, обусловленная собственным излучением плазмы.

На рисунке 4 (в) приведен пример характерной осциллограммы ВЧ компоненты рассеянного сигнала в одном из спектральных окон на установке ГДЛ. Как и в предыдущем случае, на осциллограмме цифрой «1» отмечен сигнал рассеянного излучения, цифрой «2» сигнал динамической калибровки.

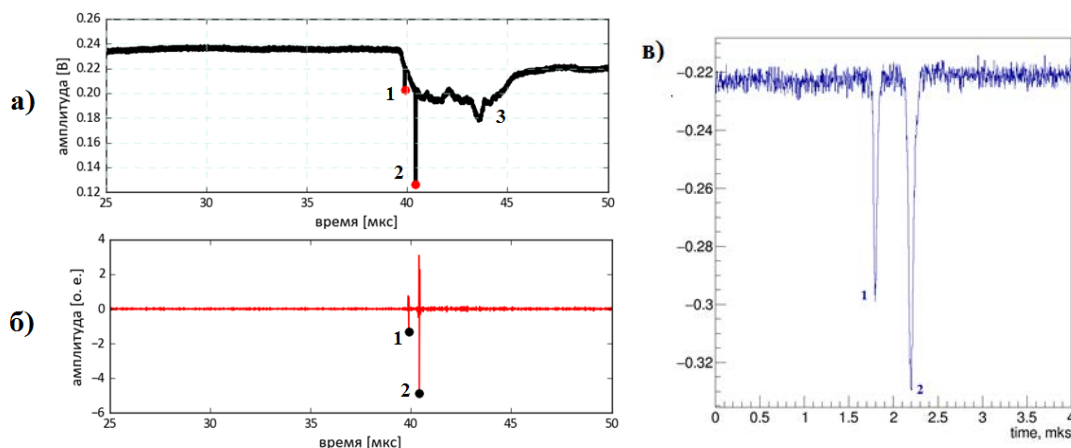


Рисунок 4. а) Осциллограмма НЧ компоненты сигнала рассеянного излучения на установке ГОЛ-3. б) Осциллограмма ВЧ компоненты сигнала рассеянного излучения на установке ГОЛ-3. в) Осциллограмма ВЧ компоненты сигнала рассеянного излучения на установке ГДЛ

В третьей главе рассматривается измерительной комплекс, разработанный для модернизированной диагностики ТР на установке ГДЛ.

В качестве источника излучения на ней используется лазер Nd:YAG длиной волны 1064 нм, работающий в импульсном и импульсно-периодическом режиме с частотой до 10 Гц. Энергия зондирующего излучения в единичном импульсе составляет 1.75 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 луча. Она имеет модульную архитектуру, в которой каждой пространственной точке соответствует отдельный спектрометр (Рисунок 5). Спектрометр содержит шесть спектральных каналов, использующих в качестве детекторов излучения лавинные фотодиоды HAMAMATSU S11519-15, работающие в спектральном диапазоне 600 – 1150 нм и обладающие квантовой эффективностью 50% на длине волны лазерного излучения 1064 нм. Седьмой, вспомогательный канал служит для регистрации энергии лазерного импульса и используется для относительной калибровки измерительных трактов.

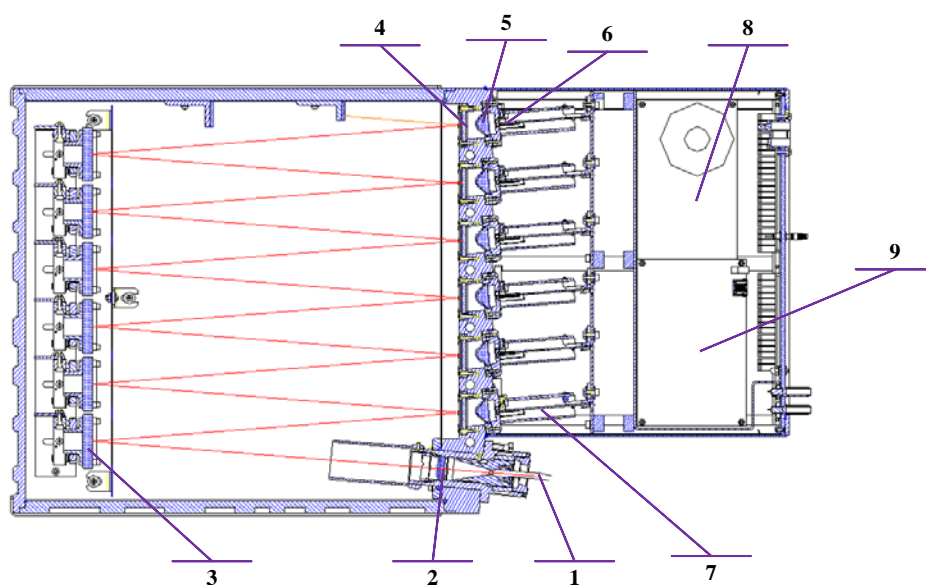


Рисунок 5. Конструкция спектрометра, совмещенного с измерительной системой: 1 – Световод, по которому вводится излучение; 2 – Ахроматический коллиматор; 3 – Вогнутое зеркало; 4 – Интерференционные фильтры; 5 – Асферическая линза; 6 – Лавинный фотодиод; 7 – Усилитель; 8 – Источник питания; 9 – Измерительная система.

Для фиксации ВЧ-компоненты сигналов рассеяния используется регистратор, построенный на основе матрицы емкостных накопителей – девятиканального кристалла DRS4 [4]. Этот кристалл позволяет фиксировать текущие амплитудные значения сигналов рассеяния с временной дискретностью ~200 пс в 9-разрядном амплитудном динамическом диапазоне. Непременным атрибутом регистраторов, построенных на основе такой методики, является необходимость проведения трудоемких процедур калибровки ячеек емкостных накопителей, что несколько усложняет их

использование. Функциональная схема регистратора представлена на рисунке 6 и включает в свой состав:

- Приемный тракт, который обеспечивает прием ВЧ-компонент сигналов рассеяния и их согласование со шкалой преобразования матрицы емкостных накопителей;
- Калибровочный тракт 1, формирующий сигналы близкие к минимуму и максимуму шкалы преобразования кристалла DRS4, для амплитудной калибровки и калибровки смещения нуля, построенный на основе ЦАП;
- Калибровочный тракт 2, формирующий сигналы синусоидальной формы, для проведения временной калибровки и возможности формирования результатов измерений с помощью нелинейной временной шкалы. Для их формирования используется генератор с петлей ФАПЧ LMK04906 и LC-фильтр второго порядка. Дополнительно кристалл LMK04906 обеспечивает формирование частоты для кристалла DRS4, АЦП и цифрового узла регистратора;
- Коммутирующий узел, обеспечивающий поступление одного из трех видов сигналов (исследуемые сигналы, сигналы постоянного уровня или синусоидальные) на матрицу емкостных накопителей. Он построен на основе аналогового ключа, который в зависимости от состояния управляющего сигнала подает на вход DRS4 один из сигналов;
- Кристалл DRS4, обеспечивающий прием сигнала с частотой несколько гигагерц и дальнейшее считывание сигнала в более медленном темпе;
- 14-разрядный восьмиканальный АЦП работающий с частотой дискретизации 30 МГц, позволяющий оцифровывать сигнал, поступающий с кристалла DRS4 и осуществляющий преобразование текущего значения амплитуды входных сигналов в код для передачи его цифровому узлу регистратора и его дальнейшей обработки.

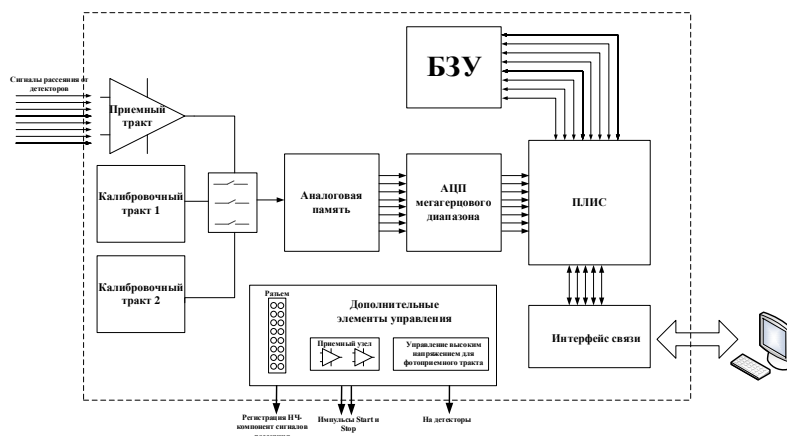


Рисунок 6. Функциональная схема регистратора на основе матрицы емкостных накопителей

В качестве дополнительных элементов управления в состав регистратора включены:

- Приемники импульсов Start и Stop, обеспечивающие фиксацию данных в разовом и в циклическом режимах с привязкой к внешнему синхросигналу;
- Элементы управления высоковольтными источниками питания, формирующими напряжения смещения для детекторов диагностики ТР;
- Вспомогательный модуль регистрации, используемый для фиксации текущих значений амплитуд НЧ-компонент сигналов рассеяния. Данный модуль подключается к ПЛИС основной платы регистратора через разъем.

Основой цифрового узла регистратора является ПЛИС серии Cyclone V [5] со встроенным процессорным узлом. ПЛИС Cyclone V, помимо набора базовых логических элементов, интегрирует в своем составе двухъядерный процессорный модуль ARM, работающий под управлением операционной системы Linux, встроенный контроллер внешней памяти LPDDR2/DDR2/DDR3, интерфейсный узел с технологией AXI/Avalon. Последний поддерживает взаимодействие процессорных ядер с контроллерами периферии, построенными на логических элементах ПЛИС, а также с интегрированным в ее состав контроллером канала связи Ethernet – 10/100/100/1000, предназначенным для сопряжения регистратора с сервером диагностики. Все операции, выполняемые Cyclone V можно разделить на два типа:

- Операции, выполняемые узлами, реализованными на логических элементах ПЛИС;
- Операции, выполняемые встроенным процессорным модулем.

На элементах ПЛИС реализованы контроллеры устройств, обеспечивающие выполнение процедур: приема данных от АЦП (основного и дополнительного), управление этими АЦП, управление генератором с петлей ФАПЧ и матрицей емкостных накопителей DRS4, управление ЦАП, задающими уровни сигналов, необходимые для проведения калибровок и для обеспечения корректной работы входных и выходных трактов DRS4, управление режимами работы аналогового тракта.

Процессорный модуль отвечает за формирование таблиц калибровочных констант и таблицы, содержащей истинные временные координаты, а также передачу результатов измерений по каналу связи Ethernet 10/100/1000 консольному компьютеру.

Для проверки работоспособности измерительного комплекса, он был испытан на диагностическом комплексе рассмотренным в главе 2. Источником излучения в этом комплексе является неодимовый лазер с длиной волны 1054 нм, формирующий импульс длительностью ~50 нс и энергией 15 Дж. В связи с тем, что интерференционные фильтры были рассчитаны для нового диагностического комплекса ТР с лазером на длине волны 1064 нм, первые два спектральных канала оказались неинформативными. Зафиксированные сигналы рассеяния в оставшихся 4-х спектральных каналах

представлены на рисунке 7. Измерения позволили вычислить электронную температуру плазмы $165 \text{ эВ} \pm 7\%$.

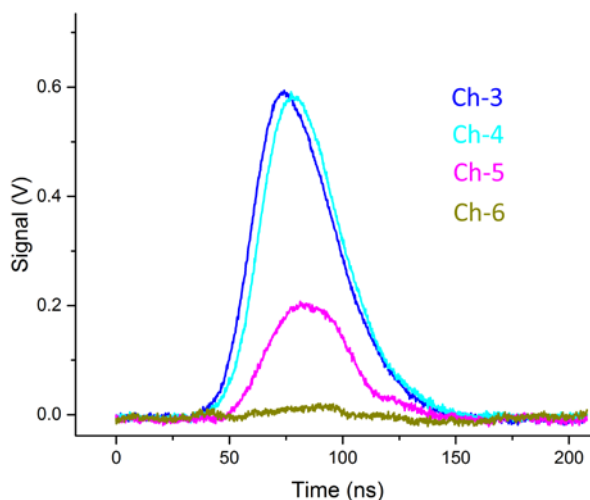


Рисунок 7. Зарегистрированные сигналы рассеяния новой измерительной системой на диагностическом комплексе TR на установке ГДЛ прошлого поколения

Измерительную систему в составе диагностического комплекса TR нового поколения на установке ГДЛ предполагается ввести в эксплуатацию в 1-м квартале 2020 года.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертации:

1. Создана система регистрации диагностики TR установок ГОЛ-3 и ГДЛ, построенная на основе восьмиканальных измерительных модулей АЦП прямого преобразования с амплитудным динамическим диапазоном 12 бит и частотой дискретизации до 500 МГц. В процессе ее создания были:
 - разработаны структура и базовые элементы модулей фотоприемников на основе лавинных фотодиодов со встроенным трансимпедансным усилителем. А также разработан модуль адаптера, сопрягающий модули фотоприемников с каналом связи Ethernet 10/100, используемым на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в качестве приборного интерфейса;
 - разработаны двухканальные регистраторы формы импульсов ADC12500 с программной конфигурацией алгоритма обработки данных, построенные на основе метода прямого преобразования, базирующегося на «оцифровке» текущих амплитудных значений сигналов быстродействующими АЦП. Эти регистраторы фиксируют текущие значения амплитуды сигналов с частотой дискретизации 500 ГГц. в 12-разрядном амплитудном динамическом диапазоне. Переконфигурируемый цифровой узел регистраторов ADC12500 дает возможность его применения в других диагностических комплексах физических установок;

- разработана система синхронизации, обеспечивающая формирование единой временной шкалы для регистраторов всех подсистем диагностик ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ.
2. Создана система регистрации модернизированной диагностики томсоновского рассеяния ГДЛ, состоящая из шести восьмиканальных измерительных модулей АЦП с масштабно-временным преобразованием с амплитудным динамическим диапазоном 10 бит и частотой дискретизации до 5 ГГц. В рамках его создания были:
- разработаны структура и базовые элементы детекторов на основе лавинных фотодиодов и малошумящих трансимпедансных усилителей. При этом удалось достичь эффекта, при котором основной вклад в шумовые характеристики детектора вносит шумовая компонента тока $i_{лфд}$;
 - на основе матрицы емкостных накопителей разработаны высокоскоростные регистраторы, обеспечивающие фиксацию сигналов рассеяния с частотой до 5 Гвыб./с. и дальнейшее их считывание в более медленном темпе;
 - разработаны исполняемые программно алгоритмы, обеспечивающие выполнение калибровки нуля, амплитудной и динамической калибровок элементарных ячеек матрицы емкостных накопителей;
 - разработаны дополнительные модули регистрации, предназначенные для фиксации НЧ-компоненты сигнала рассеяния с детекторов;
 - протестирован на диагностическом комплексе ТР прошлого поколения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Е.А. Пурьга, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.А. Иванова. Многофункциональный быстродействующий регистратор ADC12500. // Приборы и техника эксперимента, 2012, No 2, с. 75-83.
2. E.A. Puryga, Yu.S. Sulyaev, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, S.V. Polosatkin, A.F. Rovenskikh, A.V. Burdakov, E.S. Grishnyaev // Multi-Purpose Fast Neutron Spectrum Analyzer with Real-Time Signal Processing – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, V. 720, 2013, Pages 23–25.
3. А.А. Иванова, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.И. Котельников, Д.В. Моисеев, Е.А. Пурьга, А.Д. Хильченко, В.А. Хильченко, В.Г. Швырев. Регистратор импульсных сигналов для диагностик высокотемпературной плазмы // Приборы и техника эксперимента, 2016, № 3, С. 24 – 31.
4. Е. А. Пурьга, А. Д. Хильченко, А. Н. Квашнин, П. В. Зубарев, В.В. Приходько, С. В. Иваненко, Д. В. Моисеев, А. А. Касатов, В. В. Максимов, Л.Н. Вячеславов // Измерительный комплекс для диагностики Томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ - Приборы и техника эксперимента. №6, 2018, Стр. 34-42.
5. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.А. Лизунов, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, Д.В. Моисеев // Быстродействующий регистратор на основе технологий масштабно-временного преобразования для диагностики томсоновского рассеяния на установке ГДЛ, - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, стр. 77-88.
6. E.A. Puryga, A.A. Lizunov, S.V. Ivanenko, A.D. Khilchenko, Kvashnin, A.N., P.V. Zubarev, D.V. Moiseev // Data acquisition system for thomson scattering diagnostics on GDT – IEEE Transactions on Plasma Science, 2019 Volume 47, Issue 6, Pages 2883-2889.
7. Lizunov A., Verbassova T., Khilchenko A., Maximov V., Puryga E., Zubarev P. // Integrated polychromator and data acquisition system for the Thomson scattering diagnostic (2019) Journal of Instrumentation, 14 (7), статья № C07010.
8. Е.А. Пурьга, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.А. Иванова, В.И. Алейник // Измерительный комплекс системы томсоновского рассеяния установки ГОЛ-3 Тезисы 13-й всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». – Троицк, 8-13 июня 2009г, стр. 123-125.
9. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.Д. Хильченко, А.А. Иванова // Система регистрации данных диагностики параметров плазмы методом томсоновского рассеяния на установках ГОЛ-3 и ГДЛ – Материалы

- шестнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-16, 2010, стр. 673-674.
10. Л.Н. Вячеславов, М.В. Иванцовский, А.А. Касатов, С.С. Попов, Е.А. Пурьга, А.Д. Хильченко, // Система томсоновского рассеяния для измерения быстрой динамики плотности в экспериментах на установке ГОЛ-3, XXXIX международная (звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Сборник тезисов докладов, 2012, стр. 33.
 11. E.A. Puryga, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, P.V. Zubarev, A.A. Ivanova, S.V. Ivanenko // Multifunction Fast Recorder ADC12500 for Plasma Diagnostics - IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record "2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, NSS/MIC 2012" pp. 1048-1051.
 12. Л.Н. Вячеславов., М.В. Иванцовский, А.А. Касатов, С.С. Попов, Е.А. Пурьга, А.Ф. Ровенских, А.Д. Хильченко // Применение методики томсоновского рассеяния для изучения взаимодействия плазмы с электронным пучком в экспериментах по генерации СВЧ-излучения, - XLI международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, сборник тезисов докладов конференции. 2014, стр. 106.
 13. E.A. Puryga, S.V. Ivanenko, A.N. Kvashnin, A.A. Ivanova, A.I. Kotelnikov, P.V. Zubarev, A.D. Khilchenko. // The data acquisition system for Thomson scattering diagnostic on the GOL-3 and GDT- Real Time Conference (RT), 2014 Conference Records, pp. 7097503.
 14. E. A. Puryga, K. Martin, S. V. Ivanenko, A. A. Ivanova, A. I. Kotelnikov, P. V. Zubarev, A. N. Kvashnin, A. D. Khilchenko // Data Acquisition System with data reduction in real-time mode – Proceedings Of Science "Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, TIPP 2014", pp. 416.
 15. Е.А. Пурьга, А.А. Иванова, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, П. В. Зубарев, А. И. Котельников, Д. В. Моисеев // Разработка быстродействующего регистратора на основе SCA технологии для широкополосных диагностик плазмы – Сборник тезисов 16-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-16, 2015, стр. 117-118.
 16. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, П. В. Зубарев, Д. В. Моисеев «Быстродействующий регистратор для диагностики томсоновского рассеяния», Сборник тезисов 17-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», 2017, Издательство: ООО "Тривант", стр. 171-172.
 17. Puryga E.A., Ivanenko S.V., Kvashnin A.N, Khilchenko A.D, Zubarev P.V., Moiseev D.V. // High-speed recorder based on SCA technology for thomson scattering diagnostic on ITER, - В сборнике: 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop, NSS/MIC/RTSD 2016 2017. С. 8069664.

18. Puryga E.A., Ivanenko S.V., Kvashnin A.N, Khilchenko A.D, Zubarev P.V., Moiseev D.V. // The update of the recording system for the Thomson scattering diagnostic complex on GDT, - В сборнике: 2019 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop, NSS/MIC/RTSD 2018 2019.
19. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, П. В. Зубарев, Д. В. Моисеев // Модернизация измерительного комплекса для диагностики томсоновского рассеяния на установке ГДЛ – Тезисы докладов «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-18, 2019, стр. 122-124

Список литературы

- [1] С.Ю. Лукьянов, Н.Г. Ковальский // Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. – М.: МИФИ, 1997.
- [2] С. В. Полосаткин, А. В. Бурдаков, М. В. Иванцевский, В. С. Койдан, В. К. Овчар, А. Ф. Ровенских, В. В. Семионов*, М. Г. Федотов // Многоканальная система томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3 - Физика плазмы, 2006, том 32, № 2, с. 128-133.
- [3] А.А. Иванов, В.В. Приходько // Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы, - Успехи физических наук, приборы и методы исследований, Том 187. № 5, 2017, стр. 547-574
- [4] S. Ritt // Development of high speed waveform sampling ASICs
- [5] Cyclone V Device Handbook, CV-5V2 22. 07.2014, www.altera.com

ПУРЫГА Екатерина Александровна

**Системы регистрации сигналов томсоновского рассеяния в плазменных
ловушках ИЯФ СО РАН**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 22.07.2020 г. Подписано в печать 23.07.2020 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 усл. печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 5

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11