

*На правах рукописи*

**ИВАНЕНКО Светлана Владимировна**

**СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ  
ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИАГНОСТИК ПЛАЗМЫ**

**01.04.01 – Приборы и методы  
экспериментальной физики**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**НОВОСИБИРСК – 2016**

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:

ЖМУДЬ Вадим Аркадьевич – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» НГТУ, г. Новосибирск, заведующий кафедрой автоматики.

СЕМЕНОВ Игорь Борисович – кандидат физико-математических наук, Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, начальник сектора.

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

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в «\_\_\_\_\_» 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.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Лазерные диагностики нашли широкое применение в исследованиях по физике высокотемпературной плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС). С их помощью определяется характер поведения интегральных и локальных значений плотности, а также температуры плазмы в магнитных ловушках. Информативность этих диагностик во многом определяется, как технологическим потенциалом диагностического оборудования, так и техническими характеристиками средств регистрации экспериментальных данных. Последние традиционно базируются на методике прямой оцифровки сигналов датчиков аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), процедурах промежуточного накопления отсчетов АЦП в буферных запоминающих устройствах (ЗУ) и последующей передачи накопленной информации вычислительной технике для математической обработки, архивирования и представления результатов в удобном для анализа виде.

Развитие микроэлектроники и появление на рынке средств цифровой потоковой обработки данных, таких как программируемые пользователем вентильные матрицы (FPGA) и цифровые сигнальные процессоры (DSP), открыло принципиально новые возможности для развития аппаратуры и систем регистрации. Включение в состав таких систем цифровых ядер с указанным выше функциональным потенциалом не только значительно улучшает метрологические и эксплуатационные характеристики измерительных комплексов, но и позволяет формировать результаты измерения параметров плазмы в режиме близком к реальному времени. Последнее принципиально важно для решения таких задач, как: управление плазменным разрядом, поддержание плотности и температуры плазмы, подавление магнитогидродинамических (МГД) и кинетических неустойчивостей плазменного шнура. В качестве исходных «переменных» в таких приложениях используются пространственные распределения текущих параметров плазмы, формируемые многоканальными системами регистрации данных с малой временной дискретностью. Поэтому задача создания таких систем является, несомненно, актуальной. Она сопряжена не только с разработкой аппаратуры регистрации с метрологическими характеристиками, адекватными требованиям диагностик, но и с созданием специализированных средств синхронизации и запуска, формирующих жесткую временную шкалу измерительных трактов и привязку их рабочих циклов к внешним событиям.

## **Цель работы**

Целью диссертационной работы является создание многоканальных систем регистрации экспериментальных данных для лазерных диагностик плазмы на базе измерительных средств со встроенными быстродействующими узлами аналого-цифрового преобразования и цифровой потоковой обработки данных:

- одно- и многоканального (до 16 каналов) измерительного комплекса для дисперсионного интерферометра на основе  $\text{CO}_2$  лазера, позволяющего в режиме реального времени фиксировать текущие значения линейной плотности электронной компоненты плазмы с разрешением не хуже  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ ;
- 48-канального прототипа системы регистрации данных для диагностики томсоновского рассеяния дивергентной зоны токамака ИТЭР (г. Кадараш, Франция), позволяющего фиксировать на фоне интенсивного паразитного излучения плазмы форму импульсов рассеянного лазерного излучения малой длительности (3 – 5 нс) с погрешностью менее 0.1% от амплитудной шкалы измерительных трактов.

## **Личный вклад автора**

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. В частности, им были предложены структурные решения, положенные в основу построения приборной составляющей описанных в диссертации систем регистрации, разработаны алгоритмы приема и обработки данных, коррекции результатов измерений, реализуемые в режиме реального времени на элементах программируемых вентильных матриц. Автор принимал непосредственное участие в тестировании, отладке и вводе в эксплуатацию разработанных систем.

## **Научная новизна**

- Впервые, благодаря характеристикам разработанного измерительного комплекса, на установках ГДЛ (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и TEXTOR (г. Юлих, Германия) при помощи дисперсионного интерферометра на основе  $\text{CO}_2$  лазера достигнута точность измерений линейной плотности плазмы ( $N_e L$ )  $0.34 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при разрешении по времени 4 мкс.
- Благодаря уникальным алгоритмам цифровой потоковой обработки данных, используемым в измерительном комплексе, продемонстрирована возможность применения дисперсионного интерферометра на основе  $\text{CO}_2$  лазера для управления плотностью плазмы и положением плазменного шнура в камере токамака во время разряда.

- Предложенные алгоритмы коррекции результатов измерений, реализуемые в режиме реального времени, обеспечили рекордные характеристики измерительных трактов системы регистрации данных для диагностики Томсоновского рассеяния: амплитудное разрешение менее 0.1% при частоте дискретизации 2 ГГц.

### **Научная и практическая ценность**

Измерительные комплексы одно- и многоканального дисперсионных интерферометров на основе CO<sub>2</sub> лазера с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения одновременно с первичным потоком данных, описывающим характер поведения плотности плазмы в магнитной ловушке, фиксируют текущие параметры интерференционной картины. Благодаря этому в данных приборах устраняется влияние на результаты измерений набегов фазы вторичных факторов, связанных с флуктуациями интенсивности источника зондирующего излучения, с эрозией и образованием поверхностных пленок на поверхности оптических элементов, с эффектами их старения. Эта особенность, а также способность одно- и многоканальных ДИ, и их измерительных комплексов формировать результаты измерений текущих значений плотности плазмы с высоким разрешением ( $< 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) в режиме реального времени (4 мкс/отсчет) на практически не ограниченной временной базе, в том числе при наличии интенсивных механических воздействий на элементы оптических трактов, делает их практически незаменимыми не только для получения информации о характере поведения плазмы на установках, ориентированных на исследования в области физики плазмы и УТС, но и для использования в качестве источника сигналов обратной связи для контуров управления профилем плотности и положением плазменного шнура в современных магнитных ловушках. Способность одно- и многоканальных версий ДИ и их измерительных комплексов надежно работать в указанных режимах подтверждена многолетней эксплуатацией этих приборов на установках ГДЛ (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и TEXTOR (г. Юлих, Германия).

Разработка синхронных систем регистрации формы однократных импульсных сигналов малой длительности (единицы наносекунд) с высоким амплитудным разрешением (0.1%) создала необходимые предпосылки для широкого использования методики томсоновского рассеяния при проведении исследований в области физики высокотемпературной плазмы и УТС на современных экспериментальных комплексах. Востребованность систем такого рода объясняется необходимостью временного и частотного разделения полезных и паразитных компонент сигналов, формируемых при попадании в апертуру фотоприемников рассеянных плазмой и отраженных от стенок вакуумной камеры импульсов зондирующего излучения, а также собственного фонового излучения сильно турбулентной плазмы.

Созданные автором диссертации системы регистрации данных могут быть использованы в исследованиях по физике плазмы и УТС на экспериментальных комплексах ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, РНЦ «Курчатовский Институт», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», на импульсных электрофизических установках и исследовательских комплексах других исследовательских организаций и центров, в том числе при создании систем регистрации данных для лазерных диагностик международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (г. Кадараш, Франция).

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

Измерительный комплекс дисперсионного интерферометра на основе CO<sub>2</sub> лазера, обеспечивающий регистрацию линейной плотности плазмы с разрешением  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  в режиме реального времени (4 мкс/отсчет) с возможностью управлять плотностью плазмы и положением плазменного столба в процессе разряда в камере современных и будущих плазменных установок с зажиганием термоядерной реакции.

Многоканальная синхронная система регистрации данных диагностики томсоновского рассеяния, соответствующая задаче исследования плазмы в диверторной зоне токамака ИТЭР и позволяющая регистрировать форму импульсов рассеянного излучения длительностью 3 – 5 нс с погрешностью менее 0.1% от амплитудной шкалы измерительных трактов.

### **Апробация диссертации**

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (2010, г. Новосибирск), конференциях по диагностике высокотемпературной плазмы (2009, 2011, 2015, г. Звенигород), международном симпозиуме по ядерной физике (2012, г. Анахайм, США; 2015, г. Сан-Диего, США), международной конференции по системам, работающим в режиме реального времени (2013, г. Нара, Япония), опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 142 страницах, включая 91 иллюстрацию, и содержит 83 наименований библиографии.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведен анализ требований, предъявляемых к аппаратуре регистрации и системам сбора данных диагностических комплексов современных плазменных установок, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** рассмотрены базовые положения интерферометрической методики диагностики плазмы и приведен обзор традиционно используемых методов детектирования электронной плотности плазмы при помощи данной методики. В том числе с помощью счетных схем и фазовых детекторов, ориентированных на различные типы интерферометров. Приведен обзор работ, отражающих эволюцию методов детектирования плотности электронной компоненты плазмы, влияния на их развитие бурно прогрессирующей электроники и активно внедряемых в практику физического эксперимента процедур цифровой обработки данных. Особый акцент в главе сделан на описании принципа работы дисперсионного интерферометра, устойчивого, в отличие от своих предшественников, к интенсивным механическим воздействиям на элементы оптического тракта. Проанализированы особенности разработанного в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН интерферометра этого типа с источником зондирующего излучения на основе  $\text{CO}_2$  лазера [1], сформулированы требования к его измерительному тракту.

**Вторая глава** посвящена разработке измерительного комплекса дисперсионного интерферометра (ДИ) на основе  $\text{CO}_2$  лазера, предназначенного для регистрации линейной плотности плазмы ( $N_e L$ ) в режиме реального времени (4 мкс/отсчет) с результирующей погрешностью менее  $0.34 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Описана методика восстановления плотности плазмы, применяемая в данном интерферометре, а также характерные для нее алгоритмы обработки данных, исполняемые аппаратно на элементах программируемой вентильной матрицы (FPGA). Приведены результаты работы измерительных комплексов на основе ДИ на установках ГДЛ (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и ТЕТТОР (г. Юлих, Германия).

Исследования, направленные на разработку ДИ с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения на основе  $\text{CO}_2$  лазера ведутся в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН с 2001 года. В этом интерферометре выходной сигнал фотоприемника содержит осциллирующую компоненту и имеет вид  $U_{fd} = A(t) + B \sin(k \sin(\omega_m t) + \Delta\varphi)$  [2], где  $A$ ,  $B$  – параметры, связанные с интенсивностью зондирующего и опорного излучения,  $k$  – амплитуда модулирующего сигнала,  $\omega_m$  – частота модулирующего сигнала. При амплитуде осциллирующей компоненты в  $\pi$  и более радиан выходной сигнал фотоприемника изменяется от максимума до минимума независимо от набега фазы  $\Delta\varphi$ , обусловленного плазмой. Величина текущего набега фазы

фиксируется в точках равенства нулю аргумента синусоидальной функции, в которых ее значение с точностью до константы по модулю тождественно равно текущему значению амплитуды модулирующего сигнала (рисунок 1). Эта особенность рассматриваемого ДИ позволяет, при скорости изменения набега фазы менее  $\pi T / 2$ , где  $T$  – период модулирующего сигнала ( $T = 4$  мкс), используя относительно простые процедуры обработки результатов измерений, с приемлемым временным разрешением однозначно восстанавливать сколь угодно большие значения линейной плотности плазмы в точках его максимальной чувствительности.

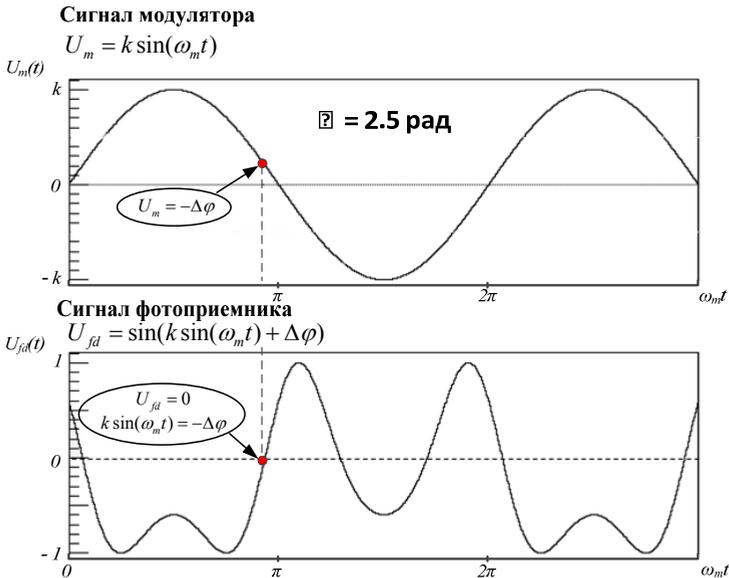


Рисунок 1. Методика восстановления электронной плотности плазмы.

Искусственная модуляция фазы одной из гармоник зондирующего излучения позволяет решить еще несколько очень важных с прикладной точки зрения технических задач. В частности, убрать за ненадобностью подстройку начальной фазы интерферометра, исключить влияние на результаты измерений набега фазы флуктуаций интенсивности лазерного излучения, временной деградации коэффициентов отражения или прозрачности элементов оптического тракта и т.д. Все это становится возможным благодаря тому, что по результатам измерений текущих значений амплитуды сигналов фотоприемника и модулятора можно полностью контролировать все параметры интерференционной картины.

Для решения задачи измерения текущих значений плотности плазмы с помощью рассматриваемого ДИ был разработан измерительный комплекс, схема которого показана на рисунке 2. Положенный в основу его работы

метод определения текущих значений набега фазы базируется на выполнении процедур:

- автоматической подстройки амплитудного динамического диапазона измерительных трактов под диапазон изменения входных сигналов;
- синхронной оцифровки (с частотой дискретизации 64 МГц) текущих значений амплитуды сигналов фотоприемника и модулятора с помощью 14-разрядных АЦП;
- «цифровой» фильтрации высокочастотных шумовых компонент указанных сигналов;
- коррекции положения нуля сигналов фотоприемника и модулятора на каждом периоде модулирующего сигнала;
- нормировки амплитуды модулирующего сигнала в тракте обработки данных;
- стабилизации глубины искусственной фазовой модуляции зондирующего излучения;
- выделения из последовательности отсчетов трактов «оцифровки» сигналов фотоприемника и модулятора информативных отсчетов;
- коррекции скачков фазы, обусловленных периодичностью аппаратной функции интерферометра.

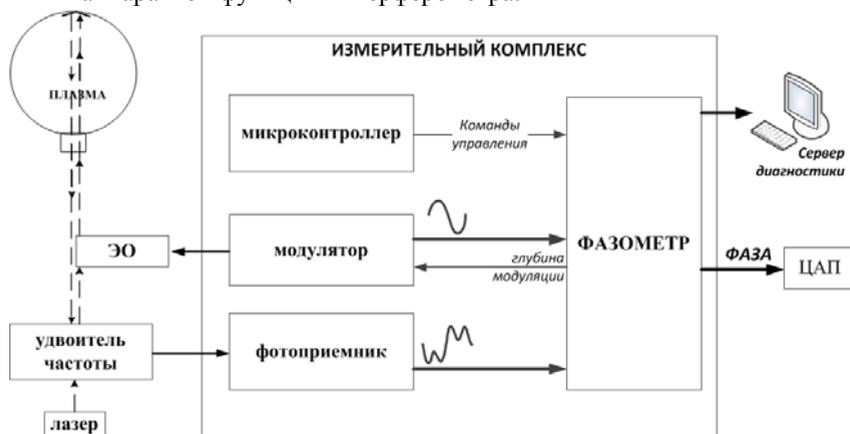


Рисунок 2. Схема одноканального ДИ с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения и его измерительный комплекс. В состав комплекса входят: **модулятор**, формирующий сигнал синусоидальной формы, поступающий на электрооптическую ячейку ЭО, **фотоприемник**, преобразующий выходной сигнал интерферометра в электрическую форму, **фазометр**, выполняющий процедуры фиксации текущих амплитудных значений сигналов модулятора и фотоприемника, их оцифровки, а также коррелированной обработки результирующих цифровых отсчетов с целью восстановления характера поведения во времени набега фазы  $\Delta\varphi$ , обусловленного изменениями плотности плазмы.

Результаты измерений набега фазы, пропорциональные текущим значениям электронной компоненты плотности плазмы, каждым модулем регистрации многоканального ДИ в режиме реального времени передаются:

- по каналу связи Ethernet-100 серверу диагностики;
- по последовательной оптоволоконной линии связи модулю удаленного ЦАП, формирующему сигнал обратной связи для контуров управления плотностью плазмы, стабилизации формы или положения плазменного шнура в магнитной ловушке.

Результаты проверки измерительного комплекса совместно с ДИ на основе CO<sub>2</sub> лазера в реальных экспериментах на газодинамической ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и на токамаке TEXTOR (г. Юлих, Германия) подтвердили его способность устойчиво фиксировать линейную плотность плазмы с временной дискретностью 4 мкс на не ограниченном временном диапазоне с разрешением по  $N_e L$   $0.34 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при скорости ее изменения до  $10^{18}$  см<sup>-2</sup>/с, а так же формировать в режиме реального времени сигналы обратной связи, замыкающие контура управления плотностью и положением плазменного шнура в магнитной ловушке.

**В третьей главе** изложены физические основы диагностики плазмы методом томсоновского рассеяния, приведен обзор литературных источников по данной теме, рассмотрены традиционно используемые в физическом эксперименте методы детектирования сигналов рассеяния, обсуждаются основные технические проблемы, возникающие при их реализации. Приведена оценка уровня шумов для традиционной схемы фотодетектора при включения лавинного фотодиода (ЛФД) в паре с малощумящим трансимпедансным усилителем, рассмотрены варианты улучшения шумовых характеристик данной схемы. Проведен сравнительный анализ осциллографической методики регистрации сигналов фотодетектора на базе сверхбыстрых АЦП и метода «двойной коррелированной выборки», указаны их достоинства, недостатки и условия применения в конкретных экспериментах.

**Четвёртая глава** посвящена разработке прототипа системы регистрации данных для диагностики томсоновского рассеяния (ТР) диверторной зоны международного термоядерного реактора ИТЭР (г. Кадараш, Франция). Приведены результаты исследований, проводимых в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, по созданию диагностического комплекса для этой диагностики и требования, предъявляемые к ее системе регистрации, обусловленные особенностями проводимых экспериментов: малой длительностью импульса рассеяния  $\sim 3 - 5$  нс, попаданием в апертуру фотоприемников сигналов, отраженных стенками вакуумной камеры, и сигналов, обусловленных собственным излучением дивертора и высокотемпературной плазмы. Сформулированы базовые принципы построения прототипа системы регистрации ТР, приведены схемы построения и описания модулей широкополосных фотоприемников и

сверхбыстродействующих регистраторов, а также синхронизации и таймирования, входящих в состав этой системы. Детально описаны алгоритмы работы цифровых узлов модулей регистрации.

Работы по созданию прототипа системы регистрации данных диагностики ТР диверторной зоны ИТЭР ведутся в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН с 2010 г. В качестве источника зондирующего излучения в диагностике используется лазер на иттрий-алюминиевом гранате (Nd:YAG,  $\lambda = 1064$  нм) с энергией и характерной длительностью зондирующих импульсов  $E = 1.5$  Дж и  $t = 3 - 5$  нс соответственно. Роль приборов, выделяющих сигналы рассеяния в семи спектральных окнах каждой из шести пространственных точек, лежащих на линии зондирования, выполняют оригинальные полихроматоры на основе интерференционных фильтров [3]. С учетом каналов измерения интенсивности сигналов рассеяния на входе каждого полихроматора, общее количество измерительных трактов в диагностике – 48. Форма выходных сигналов полихроматоров фиксируются системой сбора экспериментальных данных (рисунок 3), состоящей из фотоприемников на основе лавинных фотодиодов и широкополосных усилителей фототока, шести идентичных подсистем регистрации данных на основе 12-разрядных АЦП с частотой дискретизации 2 ГГц и общей подсистемы синхронизации.

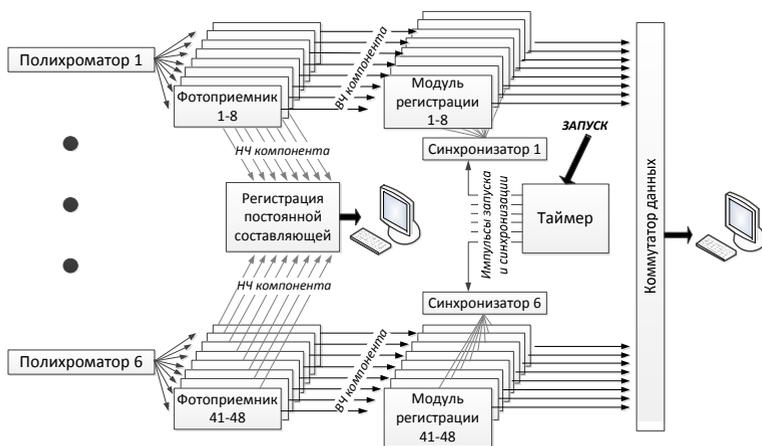


Рисунок 3. Структурная схема системы регистрации данных диагностики томсоновского рассеяния в диверторной зоне ИТЭР.

Фотоприемники преобразуют интенсивность импульсов рассеянного излучения в электрические сигналы с помощью фотодиодов S8890-15 и сверхмаломощных широкополосных (0 – 200 МГц) трансимпедансных усилителей с входными каскадами на основе GaAs HEMS транзисторов [4]. Для исключения влияния на результирующую точность измерений паразитных фоновых компонент, обусловленных излучением плазмы,

сигналы на выходах фотоприемников разделяются на высокочастотные (ВЧ) и низкочастотные (НЧ) составляющие, которые далее регистрируются независимо друг от друга. Низкочастотные составляющие выходных сигналов (0 – 1 МГц) фотоприемников, несущие информацию об уровне их фоновой засветки паразитным излучением плазмы и тепловым излучением дивертора, поступают на входы восьмиканальных 12-разрядных АЦП и синхронно преобразуются ими в цифровой эквивалент с частотой дискретизации 10 МГц. Высокочастотные компоненты этих сигналов поступают на входы сверхбыстродействующих модулей регистрации [4]. Эти модули сгруппированы в 6 идентичных подсистем. Каждая из них фиксирует ВЧ компоненты сигналов рассеяния на входе и выходах полихроматора, соответствующие той или иной пространственной точке диагностики. В основу построения модулей регистрации положен метод прямой оцифровки сигналов. В связи с отсутствием на рынке электронных компонент на момент разработки указанных модулей 12/14-разрядных кристаллов АЦП с частотой дискретизации в единицы гигагерц, основой узла преобразования стали четыре более медленных (500 МГц) 12-разрядных АЦП (ADS5463), включенных параллельно по отношению к входному сигналу. Эти АЦП управляются сдвинутыми по фазе опорными синхроимпульсами. Для компенсации напряжений сдвига нуля и масштаба преобразования по амплитуде кристаллов АЦП, а также сдвига по времени точек взятия ими отсчетов относительно предполагаемых координат, в цифровом узле регистраторов, строящемся на основе FPGA Cyclone III фирмы Altera, реализованы специальные процедуры коррекции результатов измерений. Они базируются на операциях периодической калибровки измерительных трактов. Цифровой узел регистратора отвечает за прием данных от кристаллов АЦП, коррекцию результатов измерений в режиме реального времени, реализацию различных режимов накопления данных и передачу информационных массивов серверу диагностики по каналам связи Ethernet-100. Для формирования единой временной шкалы модулей АЦП системы и одновременного их запуска используется специальная подсистема таймирования, состоящая из модуля таймера и шести идентичных модулей синхронизации. Описанный прототип системы регистрации находится на стадии ввода в эксплуатацию на установке Глобус-М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург).

**В заключении** изложены основные результаты, полученные в диссертации:

1. Предложена методика измерения электронной плотности плазмы с помощью дисперсионного интерферометра на основе CO<sub>2</sub> лазера, основанная на процедурах искусственной фазовой модуляции зондирующего излучения, оцифровки сигналов датчиков и цифровой обработки отсчетов АЦП в режиме реального времени. В рамках реализации этой методики:

- разработаны структура и базовые электронные модули измерительных комплексов для одно- и многоканального (до 16 каналов) дисперсионных интерферометров;
  - созданы реализуемые в режиме реального времени на элементах FPGA алгоритмы восстановления по отсчетам АЦП текущих значений линейной плотности плазмы (4 мкс/отсчет), исключаящие влияние на результирующее разрешение по  $N_e L$  в  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  флуктуаций интенсивности лазерного излучения и долговременной нестабильности характеристик оптических трактов;
  - созданы одно- и многоканальные измерительные комплексы дисперсионных интерферометров на основе  $\text{CO}_2$  лазера, работа которых апробирована в реальных экспериментах на установках ГДЛ (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск) и TEXTOR (г. Юлих, Германия), в том числе впервые - в качестве источника сигнала обратной связи в контуре управления плотностью плазмы магнитной ловушки (токамак TEXTOR, г. Юлих, Германия).
2. Предложен метод регистрации сигналов диагностики томсоновского рассеяния, основанный на частотном разделении полезных и фоновых компонент и процедурах оцифровки их текущих амплитудных значений сверхбыстродействующими АЦП повышенной разрядности. В процессе реализации этого метода:
- разработаны структура и базовые элементы 48-канального прототипа системы регистрации данных диагностики томсоновского рассеяния в диверторной зоне ИТЭР (г. Кадараш, Франция);
  - на основе параллельной схемы построения тракта оцифровки созданы модули сверхбыстродействующих АЦП (12 бит, 2 ГГц), а также разработаны исполняемые аппаратно в режиме реального времени алгоритмы приема, калибровки и коррекции результатов измерений, позволившие получить в полосе частот сигналов томсоновского рассеяния (0 – 200 МГц) результирующую погрешность менее 0.1% от шкалы преобразования по амплитуде;
  - разработаны структура и основные элементы подсистемы синхронизации, а также алгоритмы «привязки» циклов регистрации модулей АЦП к внешним импульсам запуска с погрешностью  $\leq 0.5 \text{ нс}$ ;
  - Создан 48-канальный прототип системы регистрации данных диагностики томсоновского рассеяния в диверторной зоне ИТЭР, работа которого апробирована на тестовых стендах и на установке Глобус-М (ФТИ им. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург) в режиме калибровки измерительных трактов.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в работах:

1. А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, С.В. Иваненко, П.В. Зубарев, Д.В. Моисеев, Ю.В. Коваленко. Измерительный комплекс дисперсионного интерферометра на основе CO<sub>2</sub> лазера. // Приборы и техника эксперимента 2009, No 3, с. 78-90.
2. P.A. Bagryansky, W. Biel, H. Dreier, S.V. Ivanenko, A.D. Khilchenko, Yu.V. Kovalenko, A.N. Kvashnin, H.T. Lambertz, A.A. Lizunov, A.V. Lvovskiy, V.Ya. Savkon, A.L. Solomakhin. Measurement of Plasma Density in Modern Fusion Devices by Dispersion Interferometer. // Fusion science and technology, V.59, No 1T, 2011, p.120-123.
3. 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.
4. S.V. Ivanenko, A.D. Khilchenko, E.A. Puryga, V.K. Ovchar, P.V. Zubarev, A.N. Kvashnin, A.A. Ivanova, A.I. Kotelnikov. Prototype of Data Acquisition Systems for ITER Divertor Thomson Scattering Diagnostic. // IEEE Transaction on Nuclear Science, 2015, V. 62, Issue 3, p. 1181-1186.
5. Хильченко, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, Д.В. Моисеев, Ю.В. Коваленко, Измерительный комплекс дисперсионного интерферометра на основе CO<sub>2</sub> лазера. А.Д. Тезисы 13-й всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». – Троицк, 8-13 июня 2009г. с 58-60.
6. А.Д. Хильченко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, Д.В. Моисеев, В.А. Хильченко, А.А. Иванова, С.В. Иваненко. Многоканальные синхронные системы регистрации экспериментальных данных и измерительные кластеры. Тезисы 13-й всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». – Троицк, 8-13 июня 2009г, стр. 30-32.
7. А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, Е.А. Пурьга, А.А. Иванова, С.В. Иваненко, 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
8. P.A. Bagryansky, W. Biel, H.Dreier, S.V.Ivanenko, A.D. Khilchenko, Yu.V. Kovalenko, A.N. Kvashnin, H.T. Lambertz, A.A. Lizunov, A.V. Lvovskiy, V.Ya. Savkon, A.L. Solomakhin. Measurement of Plasma Density in Modern Fusion Devices by Dispersion Interferometer. 8-th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Novosibirsk, Russia, 5-9 July 2010, p 41.
9. Е.А. Пурьга, А.А. Иванова, С.В. Иваненко, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев. Multifunction Fast Recorder ADC12500 for Plasma Diagnostics. 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), p 1052-1055.

10. S. Ivanenko, P. Zubarev, A. Kvashnin, E. Puryga, A. Ivanova, A. Khilchenko. Data acquisition system prototype for Thomson scattering diagnostic of ITER divertor. 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), p 1056-1059.
11. А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, В.А. Хильченко, Д.В. Моисеев, С.В. Иваненко, Е.А. Пурыга, А.А. Иванова. Система регистрации со встроенными элементами предварительной обработки экспериментальных данных. Сборник тезисов 14-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, стр. 153-155.
12. С.В. Иваненко, Е. А. Пурыга, А.Д. Хильченко, В.К. Овчар, А.Н. Квашнин, А.И. Котельников, Е.А. Пурыга, А.А. Иванова. Прототип измерительного тракта для системы лазерного рассеяния диверторной зоны ИТЭР. Сборник тезисов 14-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, стр. 139-141.
13. Е.А. Пурыга, С.В. Иваненко, А.А. Иванова, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, Л.Н. Вячеславов. Система регистрации данных для диагностики лазерного рассеяния. Сборник тезисов 14-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-14, стр. 54-56.
14. S. V. Ivanenko, A. D. Khilchenko, E. A. Puryga, V. K. Ovchar, P. V. Zubarev, A. N. Kvashnin, A. A. Ivanova, A. I. Kotelnikov, Prototype of Fast Data acquisition systems for ITER divertor Thomson scattering diagnostic, Proceedings of 19th Real Time Conference, May 26-30, 2014, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan.
15. 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. Proceedings of 19th Real Time Conference, May 26-30, 2014, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan.
16. С.В. Иваненко, А.Д. Хильченко, В.К. Овчар, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, А.И. Котельников, Е.А. Пурыга, А.А. Иванова. Прототип системы регистрации данных для диагностики томсоновского рассеяния в диверторной зоне ИТЭР. Сборник тезисов 16-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-16, стр. 110-112.

### **Список литературы**

- [1] А.Л. Соломахин, П.А. Багрянский, Р.В. Воскобойников, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, А.А. Лизунов, В.В. Максимов, А.Д. Хильченко. Дисперсионный интерферометр на основе СО2 лазера. // Приборы и техника эксперимента. - 2005. - №5. - с. 96-106.
- [2] А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, С.В. Иваненко, П.В. Зубарев, Д.В. Моисеев, Ю.В. Коваленко. Измерительный комплекс дисперсионного

интерферометра на основе CO<sub>2</sub> лазера. // Приборы и техника эксперимента 2009, No 3, с. 78-90.

- [3] E.E. Mukhin, Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER Nucl. Fusion 54 (2014) 043007 (13pp).
- [4] S. V. Ivanenko, A. D. Khilchenko, E. A. Puryga, V. K. Ovchar, P. V. Zubarev, A. N. Kvashnin, A. A. Ivanova, A. I. Kotelnikov. Prototype of Data Acquisition Systems for ITER Divertor Thomson Scattering Diagnostic. // IEEE Transaction on Nuclear Science, V. 62, Issue 3, p. 1181-1186.

ИВАНЕНКО Светлана Владимировна

**Системы регистрации данных  
для лазерных диагностик термоядерной плазмы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Сдано в набор 30.03.2016 г.

Подписано в печать 31.03.2016 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 роталпринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*