

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата физико-математических наук Семенова Игоря Борисовича

на диссертацию **ИВАНЕНКО Светланы Владимировны**

«Системы регистрации данных для лазерных диагностик плазмы»,

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 С.В. Иваненко посвящена разработке многоканальных систем регистрации данных для лазерных диагностик плазмы. Лазерные диагностики широко используются для измерения плотности и температуры плазмы в исследованиях по физике высокотемпературной плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС). Успех проводимых в данной области исследований во многом определяется, как техническими возможностями используемого диагностического оборудования и характеристиками входящей в его состав аппаратуры регистрации экспериментальных данных. В импульсных экспериментальных установках традиционно используется прямая оцифровки входных сигналов аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) с накоплением полученных данных в буферных запоминающих устройствах (ЗУ) и их дальнейшей передачей вычислительной технике для обработки и анализа результатов. В последнее время появились устройства потоковой обработки данных, такие как программируемые логические матрицы (FPGA) и цифровые сигнальные процессоры (DSP), которые открыли принципиально новые возможности для построения и использования систем регистрации экспериментальных данных. Их характерной особенностью стало наличие ядра дополнительной цифровой обработки данных, основанного на базе FPGA или DSP. Такой подход позволил не только качественно улучшить характеристики самих систем (за счет использования дополнительных алгоритмов калибровки, отладки, проверки, фильтрации и интерполяции), но и приблизить их работу к режиму реального времени. Принципиальным моментом систем регистрации нового поколения является многоканальность и синхронность их измерительных трактов, что дает возможность получения информации о временной и пространственной динамике поведения параметров плазмы. В частности результаты измерений таких систем можно использовать в контурах обратной связи для поддержания конкретных параметров плазмы, подавления магнитогидродинамических (МГД) и кинетических неустойчивостей плазменного шнура, а

так же управления работой самих диагностических комплексов и осуществления автоматического контроля за их состоянием. Поэтому задача создания таких систем является, несомненно, **актуальной**.

В диссертационной работе С.В. Иваненко получен ряд **новых результатов**.

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 CO₂ лазера была 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 токамака TEXTOR, продемонстрирована возможность применения дисперсионного интерферометра на основе CO₂ лазера для управления плотностью плазмы и положением плазменного шнура 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.

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), ФТИ им. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), Юлихского исследовательского центра (г. Юлих, Германия).

В качестве **научной и практической значимости** проведенных С.В. Иваненко исследований можно отметить следующее.

Важной особенностью измерительного комплекса дисперсионного интерферометра (ДИ) на основе CO₂ лазера является устранение (на аппаратном уровне) сбоя фазы, связанного 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 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), делает их практически незаменимыми не только для получения информации о характере поведения плотности плазмы, но и для использования их 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. Востребованность систем такого рода объясняется необходимостью временного и частотного разделения полезных и паразитных компонент сигналов.

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).

Диссертация С.В. Иваненко состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на 142 страницах и содержит 83 наименований библиографии.

Общая характеристика и содержание работы.

Во **введении** С.В. Иваненко обосновывает актуальность темы диссертации, приводит анализ требований, предъявляемых к аппаратуре регистрации и системам сбора данных диагностических комплексов современных плазменных установок, формулирует цели и задачи диссертационной работы.

В первой главе приведен обзор методов детектирования электронной плотности плазмы в интерферометрических диагностиках. Рассмотрены особенности разработанного в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН дисперсионного интерферометра на основе CO_2 лазера и сформулированы исходные требования к его измерительному тракту.

Вторая глава посвящена разработке измерительного комплекса дисперсионного интерферометра на основе CO_2 лазера, предназначенного для регистрации линейной плотности плазмы ($N_e L$) в режиме реального времени с разрешением по $N_e L$ $0.34 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. В основу методики восстановления текущих значений плотности плазмы положен принцип искусственной фазовой модуляции зондирующего излучения. Реализация этого принципа позволяет в режиме реального времени фиксировать не только данные, но и текущие

параметры интерференционной картины. Далее эти параметры можно использовать в качестве опорных при обработке данных, что исключает влияние паразитных факторов (изменений параметров оптических трактов, флуктуаций интенсивности лазерного излучения и т.д.) на результаты измерений текущих значений линейной плотности электронной компоненты плазмы.

В третьей главе обсуждаются методы детектирования сигналов томсоновского рассеяния и основные технические трудности, возникающие при этом. Рассмотрены критерии выбора средств детектирования. Проведен сравнительный анализ и указаны условия применения основных методик регистрации сигналов рассеяния: осциллографической методики на базе сверхбыстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и методики «двойной коррелированной выборки».

Четвёртая глава посвящена разработке 48-канального прототипа системы регистрации данных для диагностики томсоновского рассеяния в диверторной зоне международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (г. Кадараш, Франция). Используемая при построении данной системы методика основана на частотном разделении полезных и паразитных компонент сигналов рассеяния с их последующей оцифровкой модулями сверхбыстродействующих АЦП повышенной разрядности (12 бит, 2 ГГц). Модули АЦП используют параллельную схему построения трактов оцифровки, а также исполняемые аппаратно в режиме реального времени на элементах FPGA процедуры приема, калибровки и коррекции результатов измерений, позволяющие получить результирующую погрешностью менее 0.1% от амплитудной шкалы измерительных трактов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Автореферат диссертации С.В. Иваненко оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Он дает полное представление о содержании диссертации, о выносимых на защиту положений, о научной новизне и практической значимости. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

В качестве **замечаний к диссертационной работе** можно отметить следующее:

1. В разделе 2.3, для оценки ошибки фазы интерферометра, связанной с влиянием вибрации зеркал, желательно привести геометрию установки TEXTOR.
2. На странице 40 на Рис. 2.5 смешаны латинские и русские буквы.
3. На странице 96 в разделе 4.2 при оценке характеристик быстродействующих АЦП желательно привести теоретические зависимости $ENOB$ на частотах 500 МГц – 2 ГГц и сравнить значения разработанной аппаратуры с теоретическими значениями.

4. В разделе 4.2 при оценке точности измерений не показана ошибка, связанная с джиттером системы регистрации на частоте 2 ГГц.
5. Из общих замечаний следует отметить, что ряд рисунков плохо читаем из-за того что напечатан в черно-белом варианте.

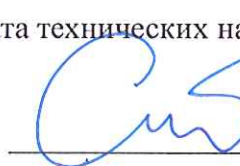
Представляемая работа прошла серьезную апробацию, ее основные результаты докладывались на российских и международных конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано 17 научных работ (из них 4 — статьи в рекомендованных ВАК журналах и 13 статей в трудах международных и Всероссийских конференций).

Необходимо отметить, что **личный вклад** С.В. Иваненков 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. Текст диссертации содержит необходимые иллюстрации и написан ясным и профессиональным языком.

Представленная диссертационная работа С.В. Иваненко 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, Иваненко Светлана Владимировна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Кандидат физ.-мат. наук
начальник сектора



И.Б. Семенов

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

Электронный адрес: a.mokeyev@iterrf.ru



А.Н. Мокеев

14 мая 2016 г.