

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт»

д. ф.-м. н., профессор

Ильгисонис В.И.



М.П.

«23» мая 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

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».

Актуальность темы

Диссертация Иваненко С.В. посвящена разработке многоканальных синхронных систем регистрации и сбора экспериментальных данных для лазерных диагностик плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Современные научные исследования в области УТС обоснованы необходимостью освоения альтернативных органическому топливу, экологически безопасных источников энергии. По мнению ряда авторитетных экспертов таковым может быть термоядерная реакция, протекающая в установках типа токамак. С целью подтверждения данной теории в настоящее время в Европе (г. Кадараш, Франция) сооружается международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР. Решение актуальных задач, поставленных в проекте ИТЭР, и отработка технических и технологических решений возложено на ряд действующих, модернизируемых и перспективных токамаков.

Лазерные диагностики широко используются в исследованиях по физике плазмы и УТС как надежное средство для измерения электронной плотности и температуры плазмы. Информативность этих диагностик во многом определяется как технологическим потенциалом диагностического оборудования, так и техническими характеристиками аппаратуры регистрации экспериментальных данных. На сегодняшний день при создании такой аппаратуры на первое место

выходит требование по обеспечению измерений временной и пространственной динамики поведения параметров плазмы, а не их локальных значений, как это было раньше. Кроме того, принципиальным моментом для ряда приложений становится возможность получения результатов измерений в режиме реального времени. Системы регистрации с такими возможностями могут быть использованы не только в качестве средств сбора экспериментальных данных, но и для решения таких важных задач, как управление плазменным разрядом, поддержание плотности и температуры плазмы, подавление магнитогидродинамических (МГД) и кинетических неустойчивостей плазменного шнура. Поэтому задача создания таких систем является, несомненно, актуальной.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа С.В. Иваненко изложена на 142 страницах, содержит 91 иллюстрацию и 83 наименований библиографии. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении С.В. Иваненко обосновывает актуальность темы диссертации, формулирует цели и задачи диссертационной работы.

В первой главе приведен обзор методов детектирования электронной плотности плазмы в интерферометрических диагностиках. Рассмотрены особенности разработанного в 2002 г. ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН дисперсионного интерферометра на основе CO_2 лазера.

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. Проведен сравнительный анализ и указаны условия применения основных методик регистрации сигналов рассеяния.

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 приводятся основные результаты диссертационной работы.

Оценка новизны и научной ценности результатов исследований

Важной особенностью разработанного Иваненко С.В. измерительного комплекса дисперсионного интерферометра на основе CO_2 лазера является способность одновременно с первичным потоком данных фиксировать текущие параметры интерференционной картины. Благодаря этому в данном приборе 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. Наряду с полученными высокими метрологическими характеристиками измерительного комплекса (способность устойчиво фиксировать линейную плотность плазмы с временной дискретностью 4 мкс на не ограниченном временном диапазоне с разрешением по $N_e L \sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$) следует отметить возможность формировать в режиме реального времени сигналы обратной связи, замыкающие контура управления плотностью и положением плазменного шнура в магнитной ловушке. Эта особенность делает комплекс дисперсионного интерферометра на основе CO_2 лазера, с созданной автором диссертации системой регистрации и потоковой обработки данных, востребованным и практически незаменимым 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.

Не менее важной задачей для физики плазмы и УТС является разработка синхронных систем регистрации формы однократных импульсных сигналов томсоновского рассеяния малой длительности (единицы наносекунд) с высоким амплитудным разрешением (0,1%). 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.

При создании прототипа системы регистрации данных для диагностики Томсоновского рассеяния в диверторной зоне ИТЭР автором диссертации были разработаны алгоритмы коррекции результатов измерений, реализуемые в режиме

реального времени, которые обеспечили рекордные характеристики измерительных трактов системы: амплитудное разрешение менее 0.1% при частоте дискретизации 2 ГГц.

Оценка практической ценности результатов исследований и их внедрение

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).

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, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, а также, после соответствующей адаптации, на токамаках НИЦ «Курчатовский Институт», 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).

Оценка достоверности результатов исследований

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).

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, в том числе: 4 статьи в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК, 5 статей в трудах международных конференций, 8 статей в трудах Всероссийских конференций. Результаты приведенных теоретических и экспериментальных исследований обсуждались соискателем на конференциях, симпозиумах и научных семинарах в России и за рубежом.

В качестве основных достоинств работы можно отметить следующие:

1. Соискателем предложена методика измерения электронной плотности плазмы с помощью дисперсионного интерферометра на основе CO₂ лазера, основанная на процедурах искусственной фазовой модуляции зондирующего излучения, оцифровки сигналов датчиков и цифровой обработки отсчетов АЦП в режиме реального времени. Методика успешно реализована соискателем в аппаратно-программном комплексе системы регистрации многоканального дисперсионного интерферометра с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения, с потоковой обработкой данных в режиме реального

времени. Наряду высокими метрологическими характеристиками по восстановлению временной и пространственной динамики плотности плазмы обеспечивается возможность формировать в режиме реального времени сигналы обратной связи для контура управления плотностью и стабилизации положения плазменного шнура.

2. Соискателем 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. Метод успешно реализован соискателем в аппаратно-программном комплексе 48-канального прототипа системы регистрации данных диагностики томсоновского рассеяния в диверторной зоне ИТЭР.
3. Соискатель внёс вклад в процесс импортозамещения высокотехнологичного научного оборудования.

По материалу представленной диссертационной работы можно сделать следующие замечания:

1. В тексте диссертации на стр.22 приведена одна формула [1.13], оформленная не по принятым в отечественной научной литературе обозначениям: вместо $\arctg$ написано $\tan^{-1}$.
2. Не указаны программные инструментальные средства, использованные при разработке аппаратно-программных средств регистрации и обработки данных.
3. Не обоснован выбор самостоятельной разработки аппаратных компонентов при наличии готовых решений, например Flex RIO компании National instruments.
4. Не приведены временные характеристики (время on-line обработки и задержка передачи данных), которые могут быть получены в контуре управления плотностью плазмы от диагностики дисперсного интерферометра в зависимости от числа используемых каналов, точности вычисления фазы и временного разрешения.
5. В диссертационной работе указано, что была продемонстрирована возможность применения дисперсионного интерферометра на основе CO_2 лазера для управления плотностью плазмы и положением плазменного шнура в камере токамака во время разряда. При этом в диссертации не хватает иллюстративных материалов и описания контура управления по обратной связи.
6. Не указаны способы интеграции системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния в CODAC ITER.

Высказанные замечания принципиально не влияют на общую положительную характеристику диссертационной работы. В целом работа выполнена на высоком научном и профессиональном уровне, является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные и проверенные на практике технические разработки, обеспечивающие решение важной прикладной задачи создания 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.

Тема и содержание диссертация С.В. Иваненко соответствуют паспорту специальности 01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК. 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.

Диссертационная работа С.В. Иваненко «Системы регистрации данных для лазерных диагностик плазмы» отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Иваненко Светлана Владимировна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Отзыв рассмотрен и утверждён на открытом научном семинаре Отдела Т-10 Курчатовского ядерно-технологического комплекса Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», протокол № 1739 от 23 мая 2016 г.

Проект отзыва подготовил:

кандидат физико-математических наук,
начальник Лаборатории информационно-управляющих систем Отдела Т-10
Курчатовского ядерно-технологического комплекса
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Соколов Михаил Михайлович
Адрес: 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.
Тел. 8(499)-196-1601
Электронный адрес: itfusion@yandex.ru



23.05.2016

Учёный секретарь Отделения токамаков
Курчатовского ядерно-технологического комплекса
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
кандидат физико-математических наук, доцент
Кузнецова Лариса Константиновна
Электронный адрес: kuznetsova_lk@nrcki.ru



23.05.2016