

ОТЗЫВ

официального оппонента

Гусева Василия Константиновича доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, почтовый адрес 194021 С. Петербург, Политехническая ул. дом. 26, телефон (812) 2973973, электронная почта

vasily.gusev@mail.ioffe.ru

на диссертацию

ПУРЫГА Екатерины Александровны

«Системы регистрации сигналов томсоновского рассеяния в плазменных ловушках ИЯФ СО РАН», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

в диссертационный совет Д 003.016.01 на базе

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

Актуальность темы диссертации

Создание быстродействующих измерительных систем, регистрирующих с высокой точностью импульсные сигналы малой амплитуды с выхода высокочувствительных детекторов частиц и излучения, испускаемых плазмой термоядерных установок является актуальной научной задачей. Необходимость регистрации однократно или ограниченно-повторяющихся сигналов усложняет задачу и затрудняет применение известных методов улучшения соотношения сигнал/шум, таких как синхронное детектирование. Корректное решение этой важной научной задачи возможно лишь при полном учете особенностей эксперимента, в котором используются различные детекторы, приборы и оборудование. Также затрудняет решение задачи необходимость многоканальной регистрации данных для сопоставления и совместного анализа временных и пространственных зависимостей измеряемых величин. Тема диссертационной работы Е.А. Пурыга, посвященная разработке многоканальных измерительных систем для диагностики томсоновского рассеяния (ТР) на физических установках Института Ядерной Физики СО РАН актуальна. Малая величина дифференциального сечения рассеяния светового излучения на свободном электроне, даже при применении мощных современных лазеров, ограничивает полезный сигнал на выходе регистрирующих фотодетекторов в крайних спектральных каналах величиной несколько сотен фотоэлектронов.

Это делает невероятно сложной проблему выделения полезного сигнала из шумов детектора и собственного излучения плазмы.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертационной работе Е.А. Пурыга получен ряд новых результатов, вносящих существенный вклад в разработку измерительной аппаратуры для диагностических комплексов физических установок. Разработанная автором аппаратура позволила впервые реализовать метод Томсоновского рассеяния на импульсной установке ГОЛ-3 при условиях многократного превышения собственного излучения плазмы над полезным сигналом, в том числе, и во время инъекции релятивистского пучка электронов. На установке ГДЛ с помощью аппаратуры, разработанной автором диссертации, были проведены пионерские измерения температуры и концентрации плазмы при нагреве СВЧ излучением на гармониках электронной частоты. В этих экспериментах была зафиксирована рекордная для газодинамических ловушек электронная температура 1 кэВ. Ключевым элементом аппаратуры регистрации сигналов томсоновского рассеяния на установках ГОЛ-3 и ГДЛ является двухканальный измеритель формы импульса полезного

сигнала, разработанный автором. Он обладает рядом достоинств, таких как достаточно высокое быстродействие (частота оцифровки 500 МГц) при большом числе разрядов – 12. Это позволяет проводить измерения электронной температуры с точностью 1-10% при зондировании плазмы излучением лазера с длиной волны 1.54 мкм импульсом с энергией 10 Дж и длительностью 20 нс. Важной особенностью измерителя является программное управление параметрами измерительных трактов и режимов работы, что позволяет его применять не только для измерения однократных сигналов, но и для работы в системах рассеяния с импульсно-периодическими лазерами.

Еще одним новым шагом в отечественном приборостроении является применение программируемых матриц емкостных накопителей с большим количеством элементарных ячеек. Использование матриц емкостных накопителей в системе быстродействующих регистраторов формы импульса рассеянного излучения с использованием специальных калибровочных процедур, позволило улучшить метрологические характеристики прибора и уменьшить объем данных, циркулирующих между прибором и сервером. Следует отметить увеличенную на порядок частоту оцифровки по сравнению с предыдущей версией регистратора (до 5 ГГц) при приемлемом динамическом диапазоне 10 бит.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы достаточно четко и хорошо согласуются с основными результатами работы, изложенными в диссертации в конце каждой главы. Их достоверность подтверждена как авторством Е.А. Пурыга в основных публикациях, так и проверкой (иногда многолетней) в экспериментах с использованием аппаратуры томсоновского рассеяния, разработанной автором. Следует отметить также, что достоверность результатов измерений, в том числе и рекордной температуры 1 кэВ, не вызывает сомнений, поскольку сигналы, измеренные в различных каналах отлично ложатся на гауссовскую кривую с полушириной, соответствующей измеренной температуре.

Выводы и рекомендации, сформулированные автором, относительно возможности более широкого применения, разработанной аппаратуры в других (не только плазменных) экспериментах обоснованы и подтверждаются в ряде публикаций. Немаловажной характеристикой, обеспечивающей эту возможность, является модульность и небольшие габариты аппаратуры, а также улучшенное энергопотребление и её относительно невысокая стоимость.

Практическая ценность результатов

Для диссертации, представленной на соискание научной степени кандидата технических наук, особенно важна практическая значимость или прикладной характер полученных результатов. Разработанные автором измерительные системы успешно эксплуатируются в диагностических комплексах томсоновского рассеяния на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в институте ядерной физики СО РАН на протяжении уже более восьми лет. Такие характеристики, как модульность, небольшие габариты, автоматизация калибровки и др., придают измерительным системам, разработанным автором необходимую гибкость - возможность переконфигурировать систему под конкретную задачу эксперимента. Благодаря набору уникальных характеристик: высокая чувствительность при хорошем соотношении сигнал/шум, большое быстродействие при достаточно высокой разрешающей способности, автоматизации процесса калибровки автору удалось получить ряд ценных физических результатов. В частности, был экспериментально подтвержден существенный рост электронной температуры плазмы в ГДЛ при инжекции микроволнового излучения. На основе двухканальных регистраторов ADC12500, был разработан регистратор ADC12500PXIe, сертифицированный по стандартам ИТЭР и

регистратор ADC122000, использованный в измерительной системе томсоновского рассеяния на установке Глобус-М. Регистраторы, построенные на основе метода масштабно-временного преобразования, удалось легко совместить со спектрометрами модернизированной диагностики томсоновского рассеяния установки ГДЛ. Этого позволила добиться грамотная схемотехника разработанных узлов и модульная структура системы регистрации, что, в конечном счете, значительно уменьшило влияние внешних электромагнитных наводок, до уровня позволяющего проводить измерения во время работы мощных СВЧ устройств. Важно отметить высокую надежность системы за счет автоматизации системы защиты высокочувствительных детекторов от аварийных режимов и возможность быстрой замены узлов, вышедших из строя. Из вышеизложенного следует, что аппаратура, разработанная Е.А. Пурыга, может применяться в широком круге физических экспериментов, в которых необходимо регистрировать слабые импульсные сигналы на фоне сильных помех, в т.ч. на современных термоядерных установках, в экспериментах по ядерной физике и физике космических лучей. Необходимо также отметить последнюю разработку автора – измерительные модули АЦП на основе матриц емкостных накопителей, реализующих принцип масштабно-временного преобразования, позволяющий измерять форму коротких импульсов 10 нс и менее. Автору удалось обеспечить очень высокое амплитудное разрешение, менее 0.1%, частоту дискретизации 5 ГГц, при этом измерительные тракты имеют сравнительно низкую стоимость.

Содержание диссертации и замечания по диссертации и автореферату

Диссертационная работа Е. А. Пурыга состоит из введения, трех глав, заключения, изложена на 132 страницах, включает 75 иллюстраций, и содержит 91 наименование библиографии. Во введении отмечена актуальность темы диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, определены цели и задачи диссертационной работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту. В первой главе проведен обзор диагностических комплексов томсоновского рассеяния на различных термоядерных установках и методов построения аппаратуры регистрации для них. Во второй главе приводится описание измерительной аппаратуры, разработанной для диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ ИЯФ СО РАН (Новосибирск, Россия). В этом измерительном комплексе для измерения сигналов рассеяния используются регистраторы, построенные на основе быстродействующих АЦП. В третьей главе рассматривается система регистрации для модернизированного диагностического комплекса томсоновского рассеяния на установке ГДЛ, позволяющая фиксировать динамику радиальных профилей электронной температуры и плотности плазмы. Рассматриваемый во второй главе диагностический комплекс позволял измерять плотность и температуру электронной компоненты плазмы только в один момент времени в одной точке пространства. Аппаратура регистрации для этого комплекса, основой которой являются девятиканальные кристаллы матриц емкостных накопителей DRS4, построена на принципе масштабно-временного преобразования. В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

К диссертационной работе имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Глава 1, Стр. 24. В ссылке [8] описывается фильтровый прибор классической схемы, а не спектрометр, построенный по схеме Черни-Тёрнера.

2. Из текста диссертации не понятно, в чем преимущество схемы фотодетектора, рассмотренного в главе 3 п.3.1. от предыдущей версии фотоприемников, рассмотренных в главе 2?

3. Глава 3, стр. 112. Не понятно, каким параметрам регистрируемых сигналов Томсоновского рассеяния соответствует соотношение сигнал/шум $SNR = 40$ дБ?
Проводились ли стендовые измерения для подтверждения этой величины?

4. Описанная в главе 3 процедура калибровки ячеек матрицы емкостных накопителей несколько усложняет использование регистратора на их основе.
Насколько важной является такая калибровка, в какой мере она влияет на динамический диапазон регистратора и как часто надо ее проводить?

Замечания к автореферату:

На стр.7, в последнем абзаце написано:

«...на основе лавинных фотодиодов и усилителей, обладающие ультранизкой величиной соотношения сигнал/шум ...»

Это, наверное, опечатка и имелся ввиду ультранизкий шум, т.к. отношение сигнал/шум обычно максимизируют?

Сделанные в отзыве замечания не имеют принципиального значения для положительной оценки диссертации Е.А. Пурыги. Диссертация представляет собой законченный научно-квалификационный труд по одному из актуальных направлений – разработка комплексных автоматизированных систем измерений, сбора, обработки и архивации данных для сложных плазмофизических экспериментов, проводимых в условиях больших электромагнитных полей, жесткого рентгеновского излучения, создающих помехи регистрирующей и управляющей аппаратуре. В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача по созданию высокочувствительных, малошумящих цифровых систем регистрации слабых световых сигналов. Качество созданной соискателем аппаратуры, подтверждается широким применением систем автора на плазменных установках Института Ядерной физики СО РАН. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Автореферат Е.А. Пурыга полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, в т.ч. из списка ВАК РФ, а также неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях. Екатерина Александровна Пурыга, безусловно, заслуживает присуждения научной степени кандидат технических наук по специальности «01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики».

Доктор физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник

федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., дом 26, тел. (812) 297-3973
e-mail: vasily.gusev@mail.ioffe.ru

В.К. Гусев

Подпись В.К. Гусева заверяю

Учёный секретарь

Кандидат физ.-мат. наук

e-mail: michael.patrov@mail.ioffe.ru

М.И. Патров

Дата: 10 сентября 2020 г.

