

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт»
П.А. ФОРШ

Форш
«09» 09 2011



ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Пурыга Е.А. посвящена созданию систем регистрации диагностики томсоновского рассеяния (ТР) для проведения экспериментальных исследований по физике высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза (УТС). В основу диагностики ТР положена методика регистрации интенсивности и спектрального состава излучения, рассеянного на свободных электронах, что позволяет измерять локальные значения температуры и плотности плазмы. Диагностика ТР относится к числу основных и используется практически на всех экспериментальных термоядерных установках.

Форма спектра нерелятивистского некогерентного ТР описывается гауссовой кривой с центром на длине волн 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. Это предопределяет использование в диагностике ТР многоканальных измерительных систем. Измерение пространственных распределений плотности и температуры плазмы, то есть фиксация сигнала в нескольких точках, приводит к пропорциональному увеличению количества каналов регистрации: например, для измерения пространственного профиля температуры и плотности электронов по десяти точкам в шести каналах

температуры и плотности электронов по десяти точкам в шести каналах спектрометра ТР, требуется 60 каналов системы регистрации. На крупных современных токамаках и стеллараторах диагностика ТР для центральной области плазменного шнуря имеет порядка 50 точек. Поэтому, в случае данной диагностики, задача создания систем регистрации с большим количеством синхронных каналов является, несомненно, актуальной.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа Пурыга Е.А. изложена на 132 страницах, содержит 75 иллюстраций и 91 наименование библиографии. Она состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении рассмотрена методология и основные методы исследования сигналов в диагностике ТР, обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи диссертационной работы.

В первой главе 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 лавинного фотодиода на шумовые характеристики аналогового тракта.

Вторая глава посвящена измерительному комплексу для диагностики ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ ИЯФ СО РАН (Россия, Новосибирск), аппаратура регистрации которого построена на основе быстродействующих АЦП. 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, имеют рабочую полосу частот сигнала от 0 до 50 МГц и итоговое соотношение сигнал/шум на уровне 34 дБ. Регистраторы ADC12500, 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. Система синхронизации обеспечивает единый масштаб времени для всех измерительных подсистем регистрации.

В третьей главе рассматривается измерительный комплекс, разработанный для модернизированной диагностики ТР на установке ГДЛ, способный фиксировать динамику радиальных профилей электронной температуры и плотности плазмы в каждом рабочем импульсе. 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. Оптическая система сбора света рассчитана на измерение температуры и плотности электронов в шести точках в плазме, расположенных вдоль лазерного пучка. Она имеет модульную архитектуру, в которой каждой пространственной точке соответствует отдельный спектральный прибор (спектрометр). Спектрометр содержит шесть спектральных каналов, использующих в качестве детекторов излучения лавинные фотодиоды.

Для фиксации сигналов рассеяния используется регистратор, построенный на основе матрицы емкостных накопителей – девятиканального кристалла DRS4. Этот кристалл позволяет фиксировать текущие амплитудные значения сигналов рассеяния с временной дискретностью ~200 пс в 11-разрядном амплитудном динамическом диапазоне.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Общая методология и методика исследования

Для построения систем регистрации ТР можно выделить несколько основных принципов. Изначально использовался метод, основанный на интегрировании сигнала детектора по времени и последующей его оцифровке. В данном методе могут применяться АЦП с относительно небольшой частотой дискретизации (несколько МГц) и расширенным амплитудным динамическим диапазоном (14–16 бит). Главным преимуществом метода интегрирования сигнала, является увеличение соотношения сигнала к шуму за счёт уменьшения полосы частот, в котором происходит регистрация того и другого. Недостатком метода интегрирования является невозможность отделения сигнала рассеяния от сигнала фонового излучения плазмы в одном измерении. Поэтому в диагностиках ТР метод интегрирования широко используется на установках с малым уровнем

собственного излучения плазмы.

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. 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 в качестве альтернативного метода высокоскоростной фиксации формы импульса, можно рассмотреть метод масштабно-временного преобразования сигналов, основанный 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. 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. Регистраторы на основе такой методики преобразования сигналов широко используются в физике высоких энергий.

Оценка достоверности результатов исследований

Достоверность и обоснованность результатов исследований и разработок автора диссертации подтверждается состоявшимися обсуждениями представленных соискателем результатов на конференциях, симпозиумах и научных семинарах в России и за рубежом, а также их практическим

использованием в экспериментальных исследованиях по физике плазмы и УТС на установках ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) ГОЛ-3 и ГДЛ.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 19 научных работах, в том числе: 7 статей в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК, 5 статей в сборниках тезисов международных конференций, 7 статей в сборниках тезисов всероссийских конференций. Результаты приведенных теоретических и экспериментальных исследований обсуждались соискателем на конференциях, симпозиумах и научных семинарах в России и за рубежом.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

В диссертационной работе Пурыга Е.А. получены следующие результаты, обладающие научной новизной и значимостью:

1. Разработанные синхронные многоканальные измерительные системы для диагностических комплексов ТР на основе быстродействующих регистраторов формы импульсов ADC12500 успешно эксплуатируются на линейных ловушках с магнитным удержанием плазмы ГОЛ-3 и ГДЛ в ИЯФ СО РАН уже более восьми лет. С их помощью 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 ТР впервые обеспечила достоверные измерения электронной температуры 1 кэВ.

2. Регистраторы ADC12500 имеют возможность программной модификации алгоритма обработки данных при помощи загружаемого в ПЛИС цифрового узла конфигурационного файла. Благодаря этому, они используются не только в диагностике ТР, но и в нейтронной диагностике, гамма-спектроскопии и при регистрации излучения плазмы на двойной плазменной частоте на установках ИЯФ СО РАН.

3. Разработанная система регистрации для модернизированного диагностического комплекса ТР на установке ГДЛ оптимизирована для использования на установках с большим числом пространственных точек наблюдения, характерных для современных крупномасштабных экспериментов по физике плазмы и УТС. Разработанные в ее рамках быстродействующие детекторы

излучения ближнего ИК диапазона на основе лавинных фотодиодов и усилителей обладают ультразвуковой величиной соотношения сигнал/шум ~ 40 Дб в полосе частот 0 – 50 МГц.

4. Быстродействующие регистраторы входящие в состав системы регистрации сигналов ТР нового поколения построены на базе матриц емкостных накопителей, реализующих принцип масштабно-временного преобразования. Они обладают следующими характеристиками измерительных трактов: амплитудный динамический диапазон 10 бит при частоте дискретизации 5 ГГц. В регистрах используется ПЛИС со встроенным процессором и контроллером Ethernet 10/100/1000, что позволило создать инновационную систему регистрации сигналов, оптимизированную для размещения на борту спектрометра ТР или аналогичного прибора.

Практическая значимость и рекомендации по использованию результатов работы

Из полученных в диссертационной работе результатов можно сделать следующие выводы. Метод, основанный на интегрировании сигналов ТР, наиболее подходит для использования на плазменных установках, на которых фоновый сигнал, обусловленный собственным излучением плазмы, фактически отсутствует или же спектры полезного и фонового сигнала существенно различаются. Для установок, в которых сигнал рассеяния сопровождается мощной фоновой компонентой, предпочтительнее использование регистраторов, построенных на основе быстродействующих АЦП. Регистраторы на основе матриц емкостных накопителей являются технически конкурентоспособной альтернативой, более выгодной с экономической точки зрения.

Ключевым недостатком матриц емкостных накопителей является достаточно большое мертвое время, обусловленное большой длительностью интервала считывания накопленной информации, в течение которого регистрация сигнала не выполняется. Величина мертвого времени зависит от количества элементарных ячеек, частоты дискретизации и частоты считывания сигнала. Однако, в диагностике ТР максимальная частота повторения импульсов лазера в импульсно-периодическом режиме работе составляет 100 Гц. Трудность возникает при

использовании лазеров, работающих в режиме pulse-burst, в котором в течении некоторого интервала времени формируется пачка импульсов с частотой до ~250 кГц. Однако, такая проблема может быть решена при использовании матриц емкостных накопителей с возможностью считывания неполного объема данных из ее конденсаторных ячеек, что в свою очередь существенно уменьшит длительность интервала мертвого времени.

К недостаткам матриц емкостных накопителей так же можно отнести тот факт, что входные и выходные каскады каждого емкостного накопителя имеют индивидуальные значения напряжения сдвига нуля и коэффициенты передачи сигналов по амплитуде. Однако, указанные недостатки можно исключить с помощью специальных калибровочных процедур.

Поэтому использование метода масштабно-временного преобразования (SCA – switch capacitor array) для построения измерительной аппаратуры диагностических комплексов является перспективном направлением развития.

По материалу представленной диссертационной работы можно сделать следующие замечания:

1. В главе 1, где рассматриваются элементы диагностических комплексов томсоновского рассеяния, дано достаточно подробное описание спектрометров с дифракционной решеткой, но нет даже краткого описания принципа работы интерференционных фильтров, что было бы логично, поскольку на их основе построен спектрометр второго описываемого в работе измерительного комплекса.

2. На странице 28 при расчете отношения сигнал-шум (SNR) для диода фирмы Hamamatsu S11519-30 не учитывается коэффициент избыточного шума лавинного умножения $B(M)$, таким образом, рассчитанное соотношение сигнал/шум меньше указанного.

3. При указании параметров регистратора, построенного по методу масштабно-временного преобразования, желательно указывать частоту считывания с матрицы емкостных накопителей, поскольку это является важной характеристикой разрабатываемого прибора.

4. При обзоре систем регистрации, в главе 1, лишь вскользь упоминаются аналоговые запоминающие устройства (АЗУ), но с учетом того, что в дальнейшем

рассматриваются современные системы, построенные по тому же принципу, стоило бы уделить этому большое внимание.

5. На ряде иллюстрациях, как, например, на рис. 2.15, 2.23, 3.13, 3.14, 3.15, 3.17 используется очень мелкий шрифт, что мешает полноценному восприятию текста.

Заключение

Высказанные замечания принципиально не влияют на общую положительную характеристику диссертационной работы. Сформулированные в работе задачи исследования достигнуты, а выносимые на защиту положения обоснованы. Можно отметить, что работа хорошо написана и структурирована: основные направления исследований выделены в отдельные главы, логично объединены для достижения поставленной цели и раскрытия основного содержания 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 в диагностике ТР.

Тема и содержание диссертации Пурыга Е.А. 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 Пурыга Е.А. «Системы регистрации сигналов томсоновского рассеяния в плазменных ловушках ИЯФ СО РАН» отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Пурыга Екатерина Александровна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 — «приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертация, автореферат диссертации рассмотрены и обсуждены на открытом научном семинаре Отдела Т-10 Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», а отзыв обсужден и одобрен открытым голосованием (единогласно) на заседании Ученого совета по физике токамаков НИЦ «Курчатовский институт» 27 августа 2020 года (протокол от 27 августа 2020 года №84).

Отзыв составил

начальник Лаборатории информационно-управляющих систем

Отдела Т-10 Отделения токамаков

Курчатовского комплекса термоядерной

энергетики и плазменных технологий

НИЦ «Курчатовский институт»,

кандидат физико-математических наук

Руководитель Курчатовского комплекса
термоядерной энергетики
и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»

Научный руководитель Курчатовского
комплекса термоядерной энергетики
и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»,
доктор технических наук

Ученый секретарь
Ученого совета по физике токамаков
Курчатовского комплекса термоядерной
энергетики и плазменных технологий
НИЦ «Курчатовский институт»,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Заместитель директора –
главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

Адрес: НИЦ «Курчатовский институт»:
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
e-mail: nrcki@nrcki.ru
<http://www.nrcki.ru>

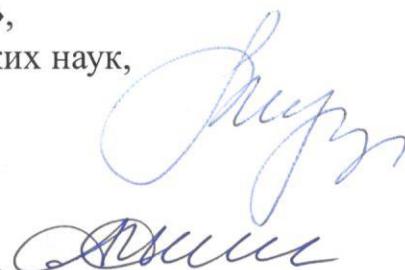


Соколов
Михаил Михайлович

Лутченко
Александр Васильевич



Хвостенко
Петр Павлович



Кузнецова
Лариса Константиновна



Николаенко
Андрей Владимирович