

УДК 621.039.667.4

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ РЕГИСТРАТОР НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАСШТАБНО-ВРЕМЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ

Е.А. Пурьга¹, С.В. Иваненко^{1,2}, А.А. Лизунов¹, А.Д. Хильченко¹, А.Н. Квашинин¹, П.В. Зубарев¹, Д.В. Моисеев¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Одним из наиболее распространённых методов для измерения температуры и плотности плазмы является метод томсоновского рассеяния. На установке ГДЛ Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия) в рамках модернизации диагностического комплекса томсоновского рассеяния был разработан быстродействующий регистратор. Для построения этого регистратора используется технология SCA (switch capacitor array), основанная на масштабном-временном преобразовании формы импульсных сигналов малой длительности. Разработанный регистратор позволяет фиксировать сигнал рассеянного излучения длительностью более 10 нс по восьми каналам на интервале до 205 нс с частотой дискретизации до 5 ГГц и амплитудным разрешением до 14 бит. В состав регистратора также включён восьмиканальный дополнительный модуль для регистрации постоянной составляющей, обеспечивающий регистрацию сигналов с частотой дискретизации 25 МГц и амплитудным разрешением 14 бит.

Ключевые слова: масштабное-временное преобразование, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), томсоновское рассеяние, быстродействующие регистраторы.

THE HIGH-SPEED RECORDER BASED ON SWITCH CAPACITOR ARRAY TECHNOLOGIES FOR THOMSON SCATTERING DIAGNOSTICS IN GDT

E.A. Puryga¹, S.V. Ivanenko^{1,2}, A.A. Lizunov¹, A.D. Khilchenko¹, A.N. Kvashnin¹, P.V. Zubarev¹, D.V. Moiseev¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Thomson scattering is one of the most commonly used methods for plasma temperature and density measurement. A high-speed recorder was developed for the gas dynamic trap (GDT) in the Budker Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk, Russia) within the framework of modernization of the Thomson scattering diagnostic system. Switch capacitor array technology, based on the scaling-time transformation of short pulsed signals form is used to build the recorder, which allows recording scattered radiation signals (longer than 10 ns) over eight channels at the intervals up to 205 ns, with a sampling rate up to 5 GHz, and an amplitude resolution up to 14 bits. The recorder also includes the eight-channel additional module for DC component recording, which provides recording of signals with a sampling rate of 25 MHz and an amplitude resolution of 14 bits.

Key words: switch capacitor array technology, field-programmable gate array (FPGA), Thomson scattering, high-speed recorders.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-2-77-88

ВВЕДЕНИЕ

Рассеяние электромагнитного излучения на электронах (томсоновское рассеяние) широко используется как метод диагностики плазмы. Функция $S(k, \omega)$, описывающая спектральную плотность мощности рассеянного излучения, содержит члены, пропорциональные электронной и ионной функциям распределения по скоростям. Настоящая работа описывает разработку быстродействующей электронной системы для регистрации сигналов, основной областью применения которой является измерение параметров плазмы на основе метода томсоновского рассеяния (ТР). В первую очередь, новый прибор предназначен для диагностики лазерного томсоновского рассеяния на газодинамической ловушке (ГДЛ) [1]. При этом параметры разработанного прибора отвечают требованиям многих других диагностик томсоновского рассеяния в современных экспериментах по магнитному удержанию плазмы. Такая постановка задачи охватывает исследования на токамаках (например, Глобус-М, JET, DIII-D [2—4]), линейных магнитных системах ГДЛ, ГОЛ-3 [1, 5] и другие эксперименты с близкими параметрами плазмы. Она также полностью отвечает параметрам крупномасштабных проектов по управляемому термоядерному синтезу: ИТЭР [6] и W7X [7]. В первую очередь, диагностика томсоновского рассеяния в этих экспериментах

применяется для определения параметров функции распределения по скоростям для электронного компонента плазмы. Для простоты будем рассматривать изотропную максвелловскую функцию распределения по скоростям электронов плазмы. Тогда характерная ширина спектра рассеянного излучения пропорциональна электронной температуре, а интеграл по длине волны пропорционален концентрации электронов.

В случае томсоновского рассеяния на свободных электронах отношение рассеянной мощности к падающей приближенно описывается формулой

$$\frac{P_s}{P_i} \cong r_0^2 n_e L d\Omega, \quad (1)$$

где $r_0^2 = 7,95 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$ — квадрат классического радиуса электрона; n_e — концентрация электронов; L — длина рассеивающей области вдоль лазерного пучка; $d\Omega$ — телесный угол сбора излучения. Для типичных параметров эксперимента на установках с магнитным удержанием плазмы это отношение имеет величину порядка 10^{-13} . Поэтому все современные диагностики томсоновского рассеяния в качестве источника излучения используют мощные импульсные лазеры. Обзор применяемых лазерных систем выходит за рамки настоящей работы. Стоит лишь указать, что большое распространение имеют неодимовые лазеры как на основе неодимового алюмоиттриевого граната (Nd:YAG) и неодимового ванадата иттрия (Nd:YVO₄), так и на основе неодимовых стёкол. Типичная энергия лазера в одном импульсе длительностью 1—20 нс составляет 1—10 Дж. Наиболее распространены лазеры энергией 1—2 Дж в импульсе длительностью около 10 нс. При таких параметрах рассеянная мощность может быть порядка нескольких микроватт, что вполне соответствует динамическому диапазону современных полупроводниковых детекторов излучения, таких как лавинные фотодиоды (ЛФД). Как правило, далее токовый сигнал ЛФД преобразуется с помощью операционных усилителей в сигнал напряжения амплитудой 0,1—1 В для приведения к амплитудному входному диапазону регистратора.

Система регистрации, описанная в данной работе, будет впервые опробована в диагностике лазерного томсоновского рассеяния на линейной магнитной ловушке для удержания плазмы ГДЛ [1]. Эта диагностика в настоящее время находится на финальном этапе разработки. Источником излучения является лазер Nd:YAG на основной гармонике с длиной волны 1064 нм, энергией в импульсе 1,7 Дж и длительностью 10 нс. Лазер имеет импульсно-периодический режим работы с частотой 10 Гц. Оптическая система сбора света рассчитана на измерение температуры и плотности электронов в 11 точках в плазме, расположенных вдоль лазерного пучка. Система регистрации оптических сигналов рассеяния имеет модульную структуру, где одной пространственной точке соответствует отдельный спектральный прибор (спектрометр). Конструкция спектрометра основана на известной схеме с узкополосными интерференционными фильтрами [8] и имеет шесть спектральных каналов регистрации с ЛФД в качестве детекторов излучения. В схеме детектирования применяются ЛФД НАМАМАТСУ S11519-15 в комбинации со специально разработанными в ИЯФ СО РАН токовыми усилителями сигнала. Параметры проектируемой диагностики на ГДЛ позволяют оценить количество фотонов в импульсе рассеяния, приходящих в спектрометр, как $(2—3) \cdot 10^5$. Эта оценка даёт приблизительно $5 \cdot 10^4$ фотонов в каждом спектральном канале регистрации. Созданные усилители сигнала ЛФД при коэффициенте передачи $\sim 5 \cdot 10^6$ В/Вт имеют шум, эквивалентный 200 фотонам за длительность лазерного импульса. В реальных условиях эксперимента с широким диапазоном по температуре и плотности плазмы ожидается соотношение сигнала к шуму 10—1000. Поэтому для диагностики требуется регистратор формы импульса с вертикальным разрешением не менее 12 бит, чтобы его эффективный динамический диапазон позволял производить измерения с максимальной точностью при любых проектных режимах эксперимента. Следует заметить, что в ряде задач более оправданным оказывается альтернативный метод регистрации, основанный на интегрировании сигнала в течение определённого интервала времени, содержащего импульс рассеяния [9, 10]. Дизайн спектрометра для диагностики лазерного томсоновского рассеяния на ГДЛ реализует концепцию регистрации, оцифровки и обработки сигналов внутри единого устройства. Поэтому регистратор сигналов должен иметь конструктив единой компактной печатной платы и иметь не менее восьми каналов. Спектрометр диагностики томсоновского рассеяния на установке ГДЛ содержит шесть мо-

дулей ЛФД. Ещё один дополнительный канал предполагается использовать для регистрации опорного сигнала лазерного импульса, снимаемого с быстрого диода, установленного на оптической плите вблизи лазера. Использованный подход позволяет разместить модули ЛФД с усилителями в непосредственной близости от системы регистрации с длиной кабельных соединений не более 100 мм внутри единого экранирующего корпуса. Для обеспечения периодических измерений система регистрации должна фиксировать и обрабатывать осциллограммы сигнала рассеяния за промежутки времени не более 10 мс. Встроенный интерфейс связи Ethernet должен обеспечивать передачу данных с необходимой скоростью. В заключение формулировки задачи важно отметить, что диагностика лазерного томсоновского рассеяния на ГДЛ имеет структуру и компонентный состав, вполне типичный для этих измерительных систем современного поколения [11—14]. Целью разработки является универсальный прибор, предназначенный для широкого спектра диагностик физического эксперимента.

МЕТОДИКА МАСШТАБНО-ВРЕМЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Одним из наиболее распространённых методов, используемых при построении систем регистрации сигналов томсоновского рассеяния, является осциллографический метод (или метод прямой оцифровки сигналов). Он основан на фиксации формы сигнала с помощью цифровых осциллографов или кристаллов аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Необходимая частота дискретизаций и амплитудный диапазон АЦП зависят от особенностей эксперимента. Для сигналов рассеяния с характерной длительностью 1—20 нс частота дискретизации АЦП должна быть не менее 50 МГц для длительности сигнала 20 нс и не менее 2 ГГц для сигнала длительностью 1 нс. Такие минимальные значения частот позволят зарегистрировать сигнал всего в двух точках. Для получения большего количества точек на сигнале необходимо увеличение этих частот. В среднем же, исходя из обзора существующих в настоящее время регистраторов, диапазон их частот дискретизации лежит в пределах от 500 МГц до 4 ГГц, а амплитудный диапазон — в пределах от 8 до 14 бит [15—17].

В качестве альтернативного метода в данной работе используется методика масштабного-временного преобразования (SCA-технологии — Switch Capacitor Array). Этот метод позволяет фиксировать текущие значения сигналов в аналоговой форме при помощи элементарных ячеек выборки и хранения (аналоговая память) и обеспечивает дальнейшее их считывание с помощью АЦП, но в более медленном темпе. Построенные на этом принципе регистраторы позволяют вести оцифровку с частотой дискретизации до нескольких гигагерц, при этом их потребляемая мощность сокращается в разы по сравнению с использованием осциллографического метода с применением высокоскоростных АЦП, что особенно важно для многоканальных измерительных систем с несколькими сотнями каналов.

Несмотря на то, что методика масштабного-временного преобразования используется в физическом эксперименте уже более 40 лет [18, 19] (в области физики высоких энергий), она не использовалась для регистрации параметров плазмы методом томсоновского рассеяния до недавнего времени [20—22]. Это связано с рядом особенностей, определяемых способом построения кристаллов аналоговой памяти. Одной из таких особенностей является достаточно большое мёртвое время, величина которого зависит от количества элементарных ячеек, частоты дискретизации аналоговой памяти, частоты считывания сигнала с помощью АЦП и вида аналоговой памяти. Наличие мёртвого времени имеет критическое значение в случае использования разрабатываемого регистратора для диагностики томсоновского рассеяния, так как полная длительность цикла «регистрация—оцифровка—вычитывание—передача данных» (с учётом мёртвого времени) должна быть меньше обратной частоты следования импульсов. Например, на установке ГДЛ на первом этапе измерений с диагностикой томсоновского рассеяния будет использоваться лазер с частотой импульсов 10 Гц. Соответствующая длительность цикла регистрации и обработки сигнала не должна превосходить 100 мс, что относительно легко обеспечить. Однако некоторые диагностические ТР с высоким разрешением по времени используют так называемые импульсно-пакетные (pulse-burst) лазеры с частотой следования импульсов в «пакете» до 250 кГц [23]. Таким образом, задача «максимум» состоит в уменьшении длительности цикла обработки данных до 4 мкс, что представляет значительную техническую трудность. Так же в связи с тем, что входные и выходные каскады каждой элементарной ячейки имеют характерные только для них напряжения сдвига нуля и коэффициенты передачи сигналов

по амплитуде, на выходах блоков ёмкостных накопителей будут формироваться сигналы с достаточно высоким уровнем шумового компонента.

В первых кристаллах аналоговой памяти значения шумового компонента занимали 7—8 разрядов и фактически технической возможности для калибровки выходного сигнала не было. Развитие в области разработки кристаллов аналоговой памяти позволило уменьшить значение шумового компонента до 5—6 разрядов. Но такого амплитудного разрешения всё равно оказалось недостаточно для современных диагностических комплексов ТР. Это связано с тем, что длительность рассеянного сигнала составляет от 1 до 20 нс при мощности $\sim 10^{-15}$ Дж. А поскольку в диагностике томсоновского рассеяния важно выделять сигнал малой длительности и малой интенсивности на фоне высокого фонового компонента плазмы, то использование регистраторов, построенных на основе SCA-метода, не представлялось возможным.

Ситуация изменилась буквально несколько лет назад. Исследования, проводимые в таких институтах, как IRFU (Сент-Обен, Франция), University of Hawai'i at Manoa (США, Гавайи), Enrico Fermi Institute (научно-исследовательское учреждение в составе Чикагского университета), Paul Sherrer Institute (Швейцария), позволили создать кристаллы аналоговой памяти с большим количеством ячеек выборки и хранения, обеспечивающих длительность регистрации сигналов до нескольких сотен нс при частоте регистрации несколько ГГц [24—28]. При этом с достаточно высокой скоростью считывания из ячеек аналоговой памяти, что существенно уменьшило значение мёртвого времени. Более того, в некоторых кристаллах аналоговой памяти, например, в кристалле DRS4, разработанном в Paul Sherrer Institute Стефаном Риттом [29], присутствует возможность неполного считывания данных из кристалла. Такая возможность позволяет использовать метод масштабного-временного преобразования для ТР даже при использовании лазеров типа pulse-burst. А новейшие разработки в области цифровой электроники (FPGA со встроенным процессором, многоядерные процессоры) дают возможность свести к минимуму значение шумового компонента до 3—4 разрядов. Все это позволяет сегодня использовать метод на основе SCA-технологии для построения регистраторов для диагностики ТР с рекордным быстродействием (до нескольких ГГц), высоким амплитудным разрешением (эффективным количеством бит (ENOB) АЦП не менее 10 бит) и малым энергопотреблением. Более того, так как конфигурация FPGA может быть легко изменена путём простого перепрограммирования, такие регистраторы могут быть без труда адаптированы для целого ряда широкополосных диагностик плазмы.

Таким образом, использование технологий масштабного-временного преобразования позволяет строить компактные, высокоскоростные, маломощные измерительные системы с большим амплитудным динамическим диапазоном для исследований параметров плазмы. Это даёт возможность получать более полную информацию о состоянии плазмы, восстанавливать пространственные распределения параметров плазмы и их временную динамику, что является в настоящее время одной из самых актуальных задач для успешных экспериментов по управляемому термоядерному синтезу (УТС).

РЕГИСТРАТОР СИГНАЛОВ ТР НА ОСНОВЕ SCA-ТЕХНОЛОГИИ

Кристалл DRS4. Для реализации метода масштабного-временного преобразования в качестве аналоговой памяти был использован кристалл DRS4. Этот кристалл является разработкой PSI (Paul Scherrer Institute). Он позволяет получить максимальную частоту дискретизации до 6 ГГц. Включает в себя девять блоков ёмкостных накопителей, содержащих по 1024 элементарных ячеек выборки и хранения. Кристалл DRS4 может работать в двух режимах регистрации. Первый из них (назовём его «разовым ждущим») предусматривает последовательную фиксацию текущих значений амплитуды входных сигналов ячейками выборки/хранения, начиная с номера 0 и заканчивая номером 1023, одновременно во всех блоках с привязкой начала интервала регистрации к внешнему импульсу запуска. Второй режим — «ждущий с предысторией» также основан на синхронной фиксации текущих амплитудных значений входных сигналов ячейками выборки/хранения с одинаковым индексом во всех блоках, но только в циклическом режиме их работы с привязкой конца процедур накопления информации к внешнему синхронному импульсу «стоп». В регистраторе на основе кристалла DRS4 реализуются оба режима регистрации.

На рис. 1, *а* представлена элементарная ячейка выборки и хранения кристалла DRS4. Выходной сигнал этого кристалла представлен на рис. 1, *б*. Как и было описано в предыдущем разделе, его высокий шумовой компонент обусловлен разбросом параметров элементарных ячеек (напряжения сдвига нуля и коэффициентов передачи сигналов по амплитуде).

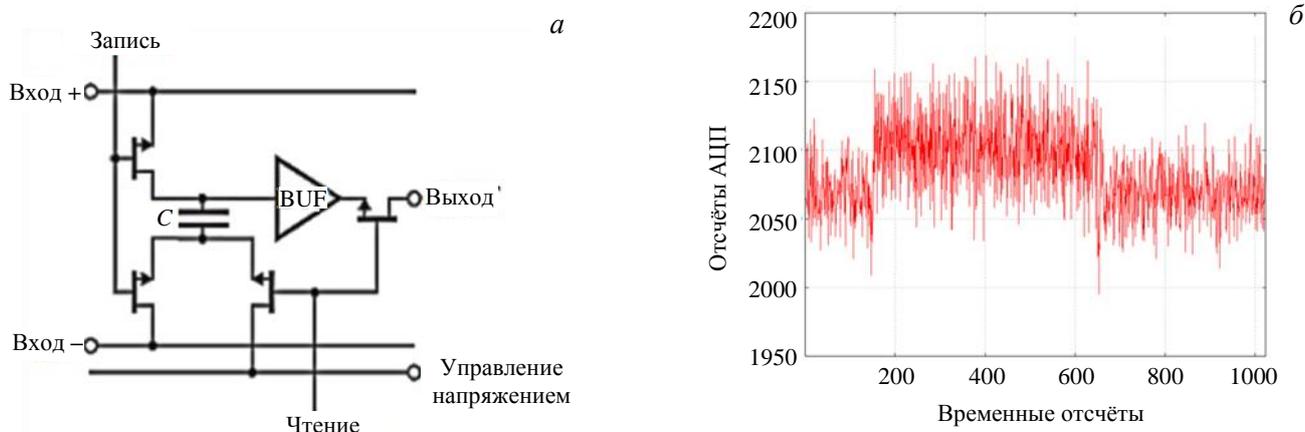


Рис. 1. Элементарная ячейка выборки и хранения кристалла DRS4 (*а*); выходной сигнал кристалла DRS4 (одного банка ёмкостных накопителей) [21] (*б*)

Общая длительность интервала регистрации данных соответствует длительности полупериода опорного синхросигнала (частота опорного синхросигнала составляет $\sim 2,4$ МГц), поступающего на модуль фазовой автоподстройки частоты (PLL) кристалла DRS4, которая при эквивалентной частоте дискретизации 5 ГГц имеет величину ~ 205 нс. В идеале при указанной частоте дискретизации задержка каждой элементарной ячейки должна быть в точности равна периоду этой частоты и иметь величину 0,2 нс. В действительности это не так. Задержки ячеек или элементарные шаги дискретизации t_0 — t_{1023} могут существенно отличаться друг от друга (на ± 100 пс и более от указанного среднего согласно документации кристалла DRS4 [28]).

Для устранения этих проблем необходимо проведение амплитудной, временной калибровки и калибровки нуля. Их суть заключается в следующем:

- в процессе калибровки напряжения смещения нуля на входы блоков ёмкостных накопителей подаётся сигнал с фиксированным уровнем. Он фиксируется, считывается и оцифровывается. Отклонения выходных сигналов каждой ячейки от среднего уровня выходного сигнала (в цифровой форме) фиксируются в таблице корректирующих констант, в которой каждая константа связана с порядковым номером ячейки (её индексом);

- при калибровке коэффициента передачи блоки ёмкостных накопителей последовательно фиксируют сигналы двух уровней — близкие к минимуму и максимуму шкалы преобразования по амплитуде. Далее для каждой ячейки выборки/хранения, уже после оцифровки указанных сигналов, фиксируется их разность. Она нормируется и заносится во вторую таблицу калибровочных коэффициентов в ячейку с номером, соответствующим индексу (или порядковому номеру) ячейки;

- для выполнения временной калибровки на входы ёмкостных накопителей подаётся синусоидальный сигнал. Он фиксируется, считывается и оцифровывается. Временное отклонение каждой элементарной ячейки рассчитывается, исходя из временного отклонения значения синуса вблизи нуля (линейная область). Значение временных отклонений выдаётся параллельно полученным данным.

В последующем, при проведении реальных измерений, из отсчёта, соответствующего конкретной ячейке, сначала вычитается первая корректирующая константа, а затем полученный результат умножается на корректирующий коэффициент из второй таблицы. При этом осциллограмма строится в координатах амплитуда—время.

Реализация этих процедур для оценки их эффективности была проведена в программе Mathcad. Было рассчитано результирующее отклонение от реального сигнала после проведения калибровок. При проведении одной итерации калибровочных процедур она составляет $\sim 5\%$, при проведении ~ 100 итераций отклонение от реального сигнала уменьшается до $0,5\%$, при проведении ~ 1000 итераций удалось

уменьшить отклонение до 0,16%. На рис. 2 показано, как изменяется сигнал в зависимости от количества проведённых операций.

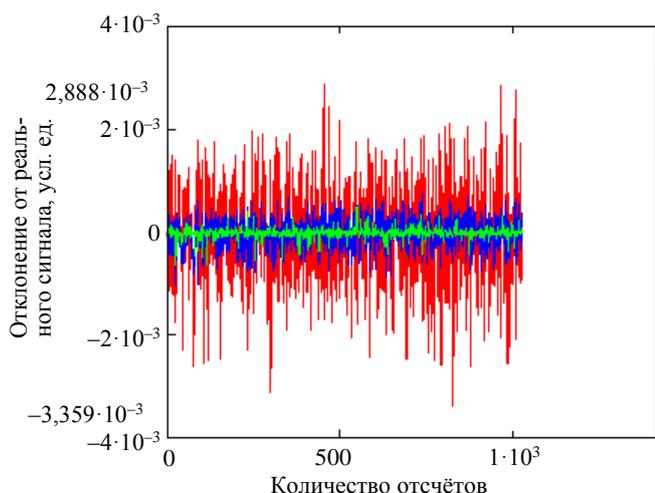


Рис. 2. Уменьшение шумового компонента на сигнале в зависимости от количества проведённых итераций калибровочных процедур: — сигнал после проведения 10 итераций; — сигнал после применения 100 итераций; — сигнал после применения 1000 итераций

Данная схема включает в себя несколько основных частей:

— приёмный тракт, который обеспечивает приём сигналов с модулей фотоприёмников и их согласование со шкалой преобразования аналоговой памяти. Этот тракт построен на базе дифференциальных усилителей ADA4950-2 ОРА с полосой пропускания 750 МГц;

— калибровочный тракт 1, формирующий сигналы, близкие к минимуму и максимуму шкалы преобразования аналоговой памяти, для амплитудной калибровки и калибровки смещения нуля, построенный на основе 12-разрядного восьмиканального цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) LTC2656;

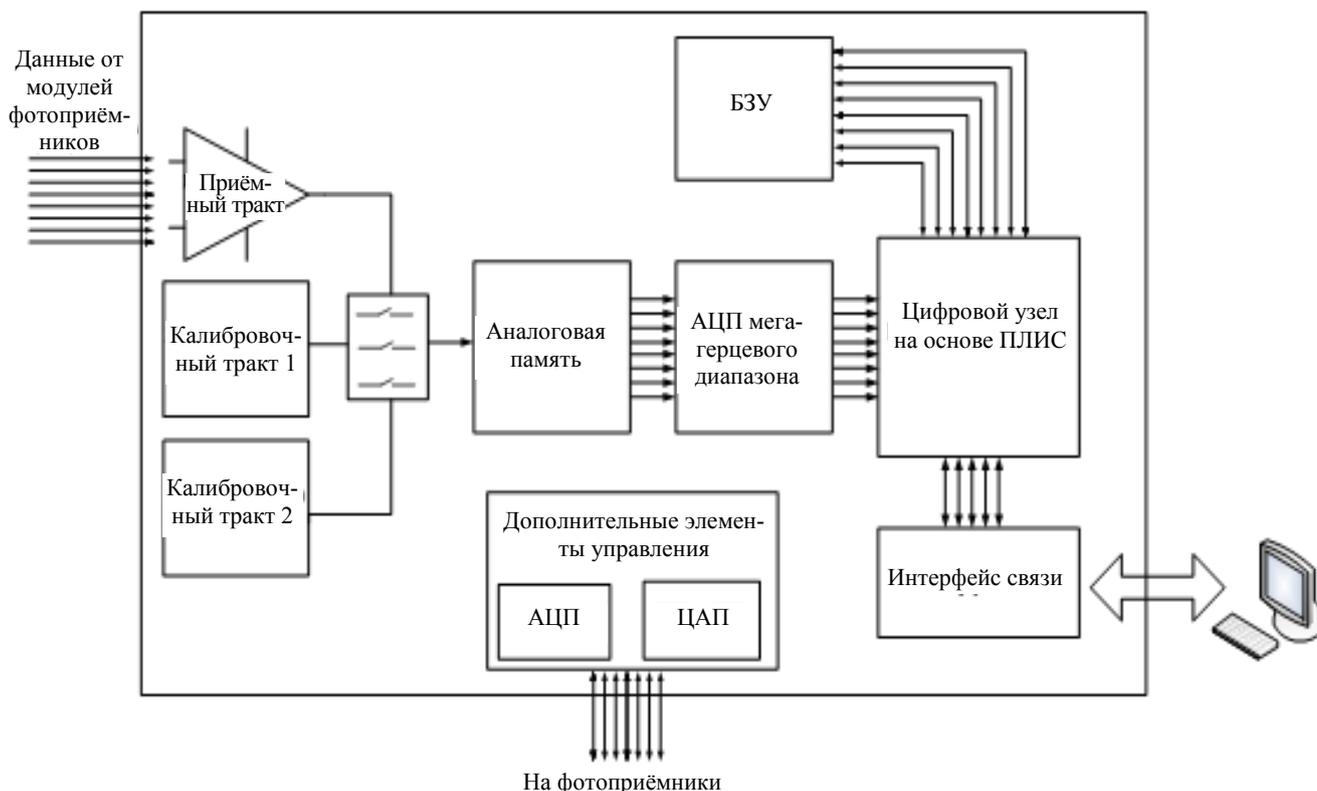


Рис. 3. Функциональная схема основного модуля регистратора

По полученным оценочным результатам из программы MathCad стало очевидно, что выполнение таких трудоёмких калибровочных процедур возможно только с помощью процессора. Таким образом, использование программируемой логической интегральной схемы (FPGA), совмещённой с процессором, является более рациональным. Это позволяет оптимально распределить аппаратные и программные ресурсы цифрового узла регистратора: упрощает его межблочные интерфейсы, даёт возможность переноса на программный уровень сложных для аппаратной реализации процедур обработки данных, востребованных в рамках статической и динамической калибровки измерительных трактов, а также коррекции результатов измерений.

Функциональная схема регистратора. На основе всего сказанного была разработана схема регистратора, представленная на рис. 3.

— калибровочный тракт 2, формирующий сигналы синусоидальной формы, для проведения временной калибровки и возможности формирования результатов измерений с помощью нелинейной временной шкалы. Для их формирования используется синхронизатор LMK04906 и LC-фильтр. Данный синхронизатор также обеспечивает формирование частоты для аналоговой памяти, АЦП и цифрового узла регистратора;

— коммутирующий узел, осуществляющий выбор входного сигнала. Он построен на основе кристалла ADG936, который в зависимости от состояния управляющего сигнала подаёт на вход аналоговой памяти один из трёх видов сигналов: сигналов с фотоприёмников, сигналов постоянного уровня или синусоидальных сигналов;

— кристалл аналоговой памяти, обеспечивающий приём сигнала с частотой несколько гигагерц и дальнейшее считывание сигнала в более медленном темпе. В качестве такого кристалла был выбран кристалл DRS4, обеспечивающий регистрацию сигнала с частотой дискретизации до 5,5 ГГц и частотой считывания не более 33 МГц. Для работы с кристаллом DRS4 необходимо установить управляющее напряжение для внутреннего буфера аналоговой памяти, напряжение смещения выходных сигналов и среднее смещение напряжения. Для этой цели используется восьмиканальный ЦАП LTC2656;

— АЦП мегагерцевого диапазона, позволяющий оцифровывать сигнал, поступающий с кристалла аналоговой памяти и осуществляющий преобразование текущего значения амплитуды входных сигналов в код для передачи его цифровому узлу регистратора и его дальнейшей обработки. Для этой цели был выбран кристалл 14-разрядного восьмиканального АЦП ADS5294, работающего на частоте дискретизации до 80 МГц. Для согласования уровней сигнала на входе АЦП ADS5294 и выходного сигнала использовался дифференциальный усилитель ADA4940-2.

Дополнительные элементы управления, формирующие сигналы для управления модулями фотоприёмников и обеспечивающие контроль над состоянием диагностического комплекса:

— медленный (килогерцевого диапазона) 16-разрядный 16-канальный АЦП, предназначенный для обеспечения контроля за высоким напряжением в модулях фотоприёмников;

— 8-канальные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), предназначенные для управления элементами диагностического комплекса;

— компараторы, решающие вопрос приёма внешних импульсов запуска;

— узел подключения дополнительного модуля. На входы данного узла поступают сигналы, формируемые от цифрового узла регистратора. На установке ГДЛ в качестве дополнительного модуля используется модуль регистрации постоянной составляющей сигнала ТР. Кроме этого, с помощью данного узла может быть подключён модуль, расширяющий количество каналов регистрации до 16;

— цифровой узел, решающий задачи приёма и предварительной обработки данных, поступающих от АЦП, калибровки всех измерительных трактов, коррекции результатов измерений и формирования результирующих информационных массивов, а также их передачи диагностическому серверу.

Цифровой узел регистратора. В качестве основы для построения цифрового узла регистратора была выбрана микросхема из семейства Cyclone V с организацией System on Chip (система на кристалле), разработанная фирмой Altera. В качестве очевидных преимуществ интеграции аппаратной и процессорной частей в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) можно указать высокую скорость обмена данными (до 125 Гбит/с), пониженную потребляемую мощность и упрощённую систему питания. Микросхема Cyclone V, помимо элементов программируемой вентиляционной матрицы (FPGA) и двухъядерного процессорного модуля (ARM и DSP), включает в свой состав встроенный контроллер внешней памяти объёмом 1 Гбайт, интерфейсный узел с технологией Avalon или AXI, поддерживающий взаимодействие процессорных ядер с контроллерами периферии, построенными на элементах FPGA, а также с контроллером канала связи Ethernet-10/100/100/1000, предназначенным для сопряжения регистратора с диагностическим сервером.

С помощью интегрированной среды разработки встроенного программного обеспечения Quartus II в цифровом узле регистратора были реализованы контроллеры приёма данных от АЦП, управления АЦП,

ЦАП, синхронизатором и аналоговой памятью DRS4, обработки потока данных с учётом рассчитанных калибровочных констант, управления режимами работы аналогового тракта (рис. 4).

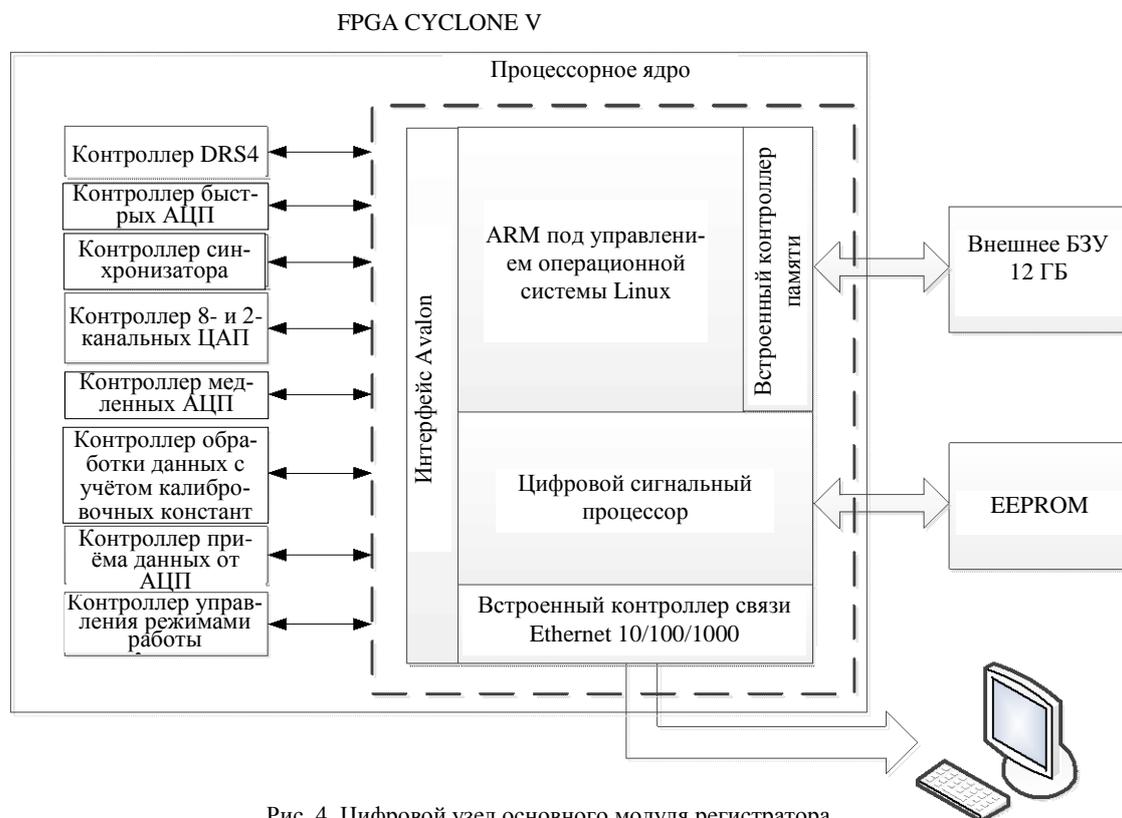


Рис. 4. Цифровой узел основного модуля регистратора

Процессорный модуль ПЛИС отвечает за расчёт калибровочных констант для калибровки сдвига нуля и амплитудной калибровки, за расчёт временных отклонений каждой ячейки выборки и хранения, за формирование двумерного массива данных для построения нелинейной шкалы в координатах время—амплитуда, за накопление отсчётов АЦП во внешнем буферном запоминающем устройстве (БЗУ) и за взаимодействие между цифровым узлом регистратора и сервером диагностики по каналу связи Ethernet 1000/100/10.

Модуль для регистрации постоянной составляющей. Как уже отмечалось, сигнал рассеяния необходимо регистрировать на фоне собственного излучения плазмы, которое может превышать его в несколько раз. Поэтому для регистрации полного диапазона сигнала с хорошим амплитудным разрешением используется разделение сигнала на высокочастотный (ВЧ) и низкочастотный компоненты (НЧ). ВЧ-компонент регистрируется непосредственно регистратором сигналов ТР, НЧ-компонент — дополнительным 8-канальным модулем регистрации постоянной составляющей, обеспечивающей регистрацию сигналов с полосой пропускания до 1 МГц. Данный модуль подключается к регистратору через специальный узел. Функциональная схема дополнительного модуля представлена на рис. 5.

Данный модуль включает в свой состав:

- входные согласующие усилители с дифференциальным входом и выходом, принимающие сигналы, формируемые детекторными узлами диагностики, построенные на основе широкополосных усилителей ADA4940-2;

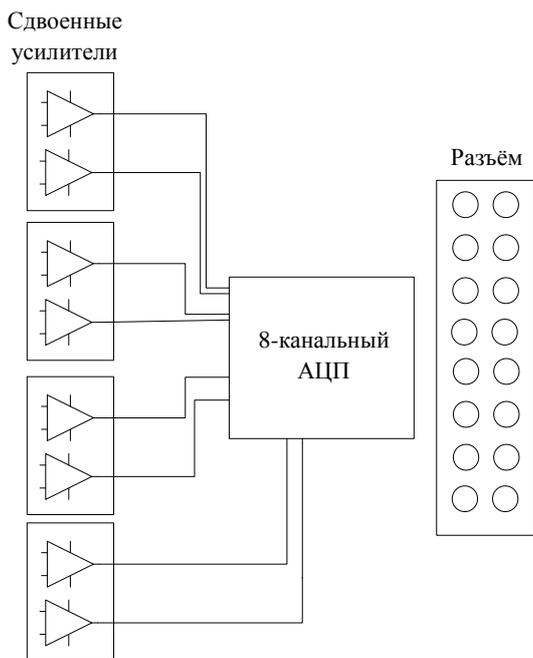


Рис. 5. Функциональная схема дополнительного модуля для регистрации постоянной составляющей

- восьмиканальный быстродействующий АЦП ADS5294 с разрядностью 14 бит, работающий с частотой дискретизации 25 МГц;
- разъём с 52 входами/выходами, через которые осуществляется сопряжение с основной платой регистратора. С его помощью обеспечиваются управление АЦП, формирование опорной частоты и приём данных от АЦП;
- стабилизаторы, обеспечивающие необходимое напряжение питания для усилителей и АЦП.

В цифровом узле регистратора реализован цифровой код, обеспечивающий приём данных от дополнительного модуля по восьми каналам с частотой дискретизации 350 МГц, запись 65 536 отсчётов во внешнее БЗУ для каждого канала и дальнейшую передачу данных диагностическому серверу по каналу Ethernet 1000/100/10.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ РЕГИСТРАТОРА

На рис. 6 показана фотография разработанного 16-канального регистратора на основе SCA-технологии в составе с дополнительным модулем регистрации постоянной составляющей. Данный регистратор обеспечивает регистрацию переменной составляющей рассеянного сигнала по восьми каналам с частотой дискретизации 5,5 ГГц и амплитудным разрешением 14 бит и регистрацию постоянной составляющей по восьми каналам с частотой 25 МГц и разрядностью 14 бит.

На рис. 7 показаны выходные сигналы регистратора до (а) и после (б) проведения калибровочных процедур в отсутствие сигнала на входе.

После проведения всех калибровочных процедур шум составил ~3—4 разряда. Таким образом, результирующее амплитудное разрешение (ENOB) регистратора составило ~10—11 бит.



Рис. 6. 16-канальный модуль регистрации в составе с дополнительным модулем регистрации постоянной составляющей

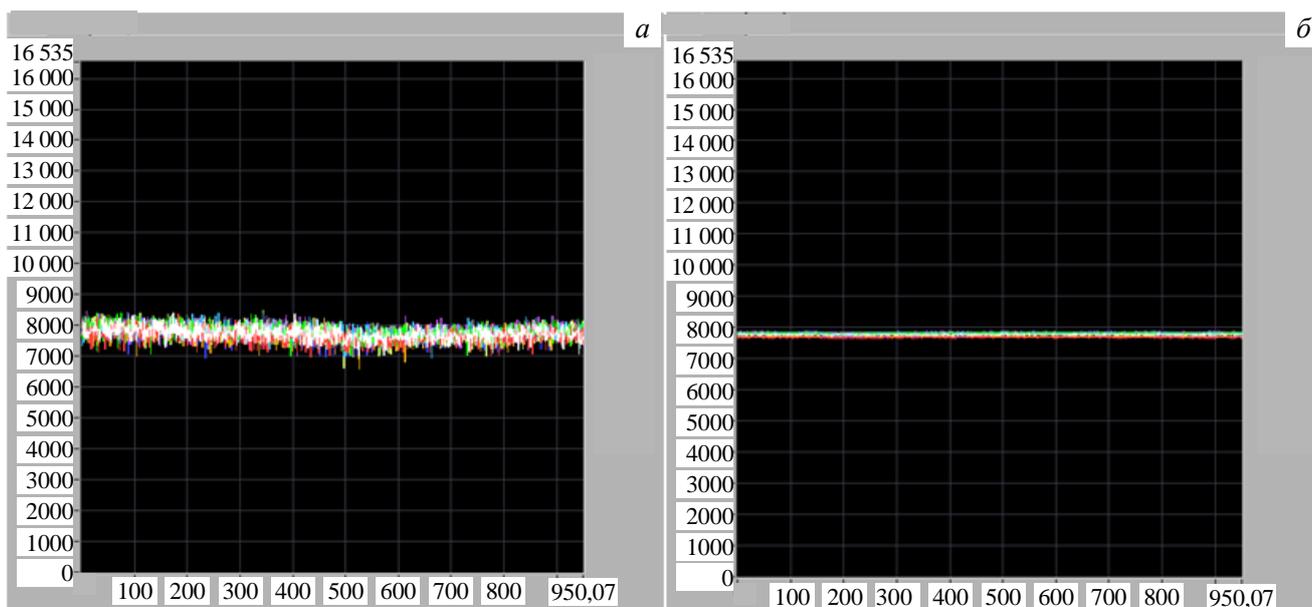


Рис. 7. Нулевой сигнал, зарегистрированный с помощью регистратора (а); нулевой сигнал после проведения калибровочных процедур (б). По оси у отложены отсчёты АЦП, где один отсчёт соответствует 60 мкВ, по оси х — время, один отсчёт соответствует 0,2 нс: □ — CH1; ■ — CH2; ■ — CH3; ■ — CH4; ■ — CH5; ■ — CH6; ■ — CH7; ■ — CH8

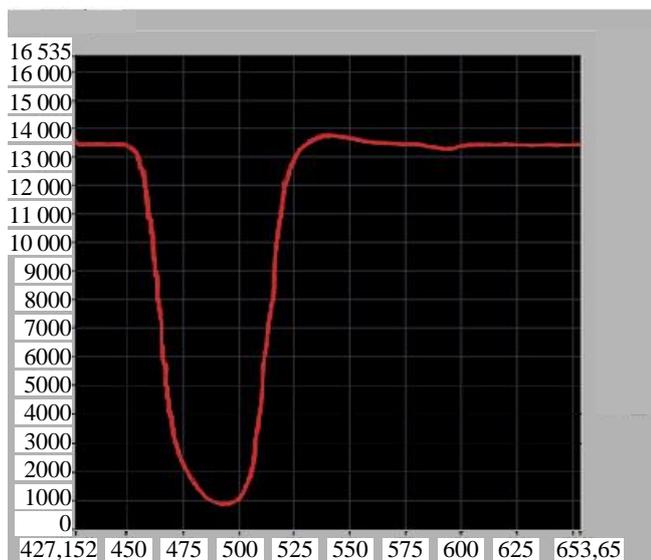


Рис. 8. Импульс длительностью 10 нс, зарегистрированный регистратором. По оси y отложены отсчеты АЦП, где один отсчет соответствует 60 мкВ, по оси x — время, один отсчет соответствует 0,2 нс. Диапазон входного сигнала соответствует значениям от $-0,5$ В до $+0,5$ В: ■ — CH2

На рис. 8 показан выходной сигнал регистратора при подаче на вход одного из каналов последовательности из импульсов величиной 10 нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время закончена разработка образца 16-канального регистратора, который обеспечивает регистрацию переменной составляющей рассеянного сигнала по восьми каналам с частотой дискретизации 5,5 ГГц и результирующим амплитудным разрешением регистратора ~ 10 –11 бит, а также регистрацию постоянной составляющей по восьми каналам с частотой 25 МГц и разрядностью 14 бит. В ближайшее время планируется испытание на установке ГДЛ восьми таких модулей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-79-10200.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов А.А., Приходько В.В.** Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы. — УФН, 2017, т. 187, № 5, с. 547–574.
2. **Курский Г.С., Толстяков С.Ю., Березуцкий А.А., Гусев В.К., Кочергин М.М., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Семёнов В.В., Чернаков П.В.** Модернизация диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 2, с. 81.
3. **JET Team (Rebut P.H., Gibson A., Huguét M., Adams J.M., Alper V., Altman M. et al.).** Fusion energy production from a deuterium-tritium plasma in the JET tokamak. — Nucl. Fusion, 1992, vol. 32, p. 187.
4. **Greenfield C.M. and the DIII-D Team.** DIII-D contributions towards the scientific basis for sustained burning plasmas. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, p. 1–17.
5. **Burdakov A.V., Azhannikov A.V. et al.** Plasma heating and confinement in GOL-3 multi mirror trip. — Fusion Science and Technology, 2007, vol. 51 (2T), p. 106–111.
6. **Shimomura Y., Murakami Y., Polevoi A.R., Barabaschi P., Mukhovatov V., Shimada M.** ITER: opportunity of burning plasma studies. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2001, vol. 43, p. A385.
7. **Klinger T. and the Wendelstein 7-X Team.** Performance and properties of the first plasmas of Wendelstein 7-X. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2017, vol. 59, p. 014018.
8. **Carlstrom T.N., DeBoo J.C., Evanko R., Greenfield C.M., Hsieh C.-L., Snider R.T., Trost P.** A compact, low cost, seven channel polychromator for Thomson scattering measurements. — Review of Scientific Instruments, 1990, vol. 61, p. 2858.
9. **Patel K., Kumara A.** Fast integrator based data acquisition system for the SST-1 Thomson scattering system. — Review of Scientific Instruments, 2010, vol. 81, p. 043501.
10. **Zang Qing, Zhao Junyu, Yun Gaoqian, Shi Lingwei, Xu Yajie.** Multipulse Nd:YAG Laser Thomson scattering diagnostics on HT-7 tokamak. — Plasma Science and Technology, 2008, vol. 10, № 1, p. 13–17.
11. **Pasch E., Beurskens M.N., Bozhenkov S.A., Fuchert G., Knauer J., Wolf R.C. and W7-X Team.** The Thomson scattering system at Wendelstein 7-X. — Rev. Sci. Instrum., 2016, vol. 87(11), p. 11E729.
12. **Ponce-Marquez D.M., Bray B.D., Deterly N.M., Liu C. Eldon D.** Thomson scattering diagnostic upgrade on DIII-D. — Rev. Sci. Instrum., 2010, vol. 81, p. 10D525.
13. **Reusche J.A., Borchardt M.T., Den Hartog D.J., Falkowski A.F., Holly D.J., O’Connell R., Stephens H.D.** Multipoint Thomson scattering diagnostic for the Madison symmetric torus reversed-field pinch. — Rev. Sci. Instrum., 2008, vol. 79, p. 10E733.
14. **Yamada I., Narihara K., Funaba H., Yasuhara R., Kohmoto T., Hayashi H.** Current status of the LHD Thomson scattering system. — J. of Instrumentation, 2012, vol. 7, № 5, p. C05007.
15. **Ivanenko S.V., Khilchenko A.D., Puryga E.A., Ovchar V.K., Zubarev P.V., Kvashnin A.N., Ivanova A.A., Kotelnikov A.I.** Prototype of data acquisition systems for ITER divertor Thomson scattering diagnostic. — IEEE Transaction on Nuclear Science, 2008, vol. 62, Issue 3, p. 1181–1186.

16. **Aftanas M., Bilkova P., Bohm P., Weinzettl V., Stockel J., Hron M., Panek R., Scannell R., Walsh M.** Data acquisition system and data processing for the new Thomson scattering system on the COMPASS tokamak. — In: WDS'10. Proc. of Contributed Papers, 2010, Part II, p. 28—32.
17. **Scannell R., Walsh M.J., Dunstan M.R., Figueiredo J., Naylor G., O'Gorman T. et al.** A 130 point Nd:YAG Thomson scattering diagnostic on MAST. — Review of Scientific Instruments, 2010, vol. 81, p. 10D520.
18. **Шейнгейзиг А.А., Сазанский В.Я.** Регистратор однократных импульсных сигналов АФИ-16: Препринт ИЯФ СО АН СССР № 79—37. — Новосибирск, 1979. 10 с.
19. **Walker J., Chae S., Shapiro S., Larsen R.** Microstore — the Stanford Analog Memory Unit. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, NS-32, № 1, p. 616—621.
20. **Пурыга Е.А., Иванова А.А., Иваненко С.В., Квашнин А.Н., Хильченко А.Д., Зубарев П.В., Котельников А.И., Моисеев Д.В.** Быстродействующий регистратор формы импульсных сигналов на основе SCA-технологии для широкополосных диагностик плазмы. — В сб.: Тез. докл. 16-й Всерос. конф. «Диагностика высокотемпературной плазмы». Звенигород, 7—11 июня 2015 г., с. 117—118.
21. **Солоха В.В. и др.** Применение прототипа цифрового полихроматора для измерений кинетических параметров плазмы токамака Глобус-М методом томсоновского рассеяния. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 1, с. 5—13.
22. **Solokha V. et al.** Digital filter polychromator for Thomson scattering applications. — J. Phys., 2018, Conf. Ser., vol. 982, p. 012003.
23. **Harris W.S., Den Hartog D.J., Hurst N.C.** Initial operation of a pulse-burst laser system for high-repetition-rate Thomson scattering. — Rev. Sci. Instrum., 2010, vol. 81, p. 10D505.
24. **Bechtola K., Funke S., Okumura A., Ruckmanb L.L., Simonsa A., Tajima H., Vandenbroucke J., Varnerb G.S.** TARGET: a multi-channel digitizer chip for very-high-energy gamma-ray telescopes. — Astroparticle Physics, 2012, vol. 36, p. 156—165.
25. **Varner G., Edralin B., Mostafanezhad I.** The TARGETX ASIC for the Belle II muon detector scintillator upgrade. — In: Nuclear Science Symp. and Medical Imaging Conf. (NSS-MIC). San Diego, Nov. 2015.
26. **Delagnes E., Degerli Y., Goret P., Nayman P., Toussnel F., Vincent P.** SAM: a new GHz sampling ASIC for the H.E.S.S.-II front-end electronics. — Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, November 2006, vol. 567, № 1, p. 21—26.
27. **Glicenstein J.-F., Bolmont J., Corona P., Delagnes E., Feinstein F., Gascon D., Naumann C.-L., Nayman P., Ribo M., Sanuy A., Siero X., Tavernet J.P., Toussnel F., Vincent P., Vorobiov S.** The NECTAr project: a new electronics design for Cherenkov telescope arrays. — In: Proc. 32nd Intern. Cosmic Ray Conf. (ICRC-2011). Beijing, China, 11—18 Aug. 2011, vol. 9, p. 67—69.
28. **Oberla E., Genat J.-F., Grabas H., Frisch H., Nishimura K., Varner G.** A 15 GSa/s, 1.5 GHz bandwidth waveform digitizing ASIC. — Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2014, vol. A 735, p. 452—461.
29. **Ritt S.** Design and performance of the 6 GHz waveform digitizing chip DRS4. — In: IEEE Nuclear Science Symposium 2008, Conference Record, p. 1512—1515.



Екатерина Александровна Пурыга, н.с.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева 11, Россия
gvinkate@gmail.com



Светлана Владимировна Иваненко, н.с., к. техн. н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева 11, Россия; н.с.; Новосибирский государственный технический университет, 630092 Новосибирск, просп. К. Маркса 20, Россия



Андрей Александрович Лизунов, с.н.с., к.ф.-м.н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева 11, Россия



Александр Дмитриевич Хильченко, в.н.с., д. техн. н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева 11, Россия



Андрей Николаевич Квашнин, с.н.с.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева 11, Россия



Петр Васильевич Зубарев, н.с.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева 11, Россия



Денис Вадимович Моисеев, ведущий инженер; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева 11, Россия

Статья поступила в редакцию 28 марта 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 77—88.