

УДК 533.9.082.5

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОТИПА ЦИФРОВОГО ПОЛИХРОМАТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М МЕТОДОМ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

V.V. Solokha^{1,3}, G.S. Kurskiev¹, E.E. Mukhin¹, S.Yu. Tolstyakov¹, A.N. Bazhenov^{1,3}, Yu.V. Petrov¹, V.K. Gusev¹, N.V. Sakharov¹, N.A. Babinov^{1,3}, I.M. Bukreev¹, A.M. Dmitriev¹, M.M. Kochergin¹, A.N. Koval¹, A.E. Litvinov¹, S.V. Masyukevich², A.G. Razdobarin¹, D.S. Samsonov¹, V.V. Semenov¹, V.A. Solovey¹, P.V. Chernakov², Al.P. Chernakov², An.P. Chernakov²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия

²ЗАО «Спектрал-Тех», С.-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург, Россия

В исследованиях физики процессов удержания, нагрева и устойчивости плазмы на термоядерных установках с магнитным удержанием незаменимую роль играет метод измерения локальных значений температуры и концентрации электронов по томсоновскому рассеянию лазерного излучения. В данной работе представлены результаты испытания прототипа цифрового фильтрового полихроматора, предназначенного для измерения интенсивности рассеянного излучения и его спектра. Отличительной особенностью данного спектрометра является использование АЦП с аналоговой памятью, работающего при частоте дискретизации 5 ГГц при разрядности 12 бит. Низкое энерговыделение и компактное исполнение позволяют интегрировать систему регистрации и обработки сигналов в корпус спектрального прибора, получив таким образом полностью автономное устройство, гальванически развязанное от других систем и оборудования. Собранные из плазмы рассеянное лазерное излучение по оптоволоконной линии поступает на вход полихроматора, а обработанные сигналы рассеяния и рассчитанные значения температуры и концентрации электронов доступны по цифровому интерфейсу. Испытания прототипа были проведены в составе системы томсоновского рассеяния (ТР) на токамаке Глобус-М с применением двух типов лазеров Nd:YAG 1064 нм и Nd:Glass 1055 нм с энергией в импульсе до 2 Дж и длительностью импульса 4 и 40 нс соответственно. Применение сверхбыстрой оцифровки позволило провести регистрацию сигналов рассеяния в осциллографическом режиме, продемонстрировав возможность временной отстройки от паразитно-рассеянного излучения даже при длительности лазерного импульса 40 нс несмотря на относительно малый размер вакуумной камеры ~1 м. В работе представлены результаты измерения в плазменном эксперименте на токамаке Глобус-М и приведён сравнительный анализ с данными действующей системы ТР.

Ключевые слова: диагностика плазмы, высокотемпературная плазма, томсоновское рассеяние, спектрометр.

STUDY OF KINETIC PARAMETERS OF GLOBUS-M PLASMA BY THOMSON SCATTERING USING ADVANCED DIGITAL POLYCHROMATOR

V.V. Solokha^{1,3}, G.S. Kurskiev¹, E.E. Mukhin¹, S.Yu. Tolstyakov¹, A.N. Bazhenov^{1,3}, Yu.V. Petrov¹, V.K. Gusev¹, N.V. Sakharov¹, N.A. Babinov^{1,3}, I.M. Bukreev¹, A.M. Dmitriev¹, M.M. Kochergin¹, A.N. Koval¹, A.E. Litvinov¹, S.V. Masyukevich², A.G. Razdobarin¹, D.S. Samsonov¹, V.V. Semenov¹, V.A. Solovey¹, P.V. Chernakov², Al.P. Chernakov², An.P. Chernakov²

¹Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

²SpectralTech Ltd., Saint-Petersburg, Russia

³Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

The local measurements of electron density and temperature values by Thomson scattering (TS) diagnostics are essential for research of energy confinement, plasma heating and control at nuclear fusion devices. This paper presents the digital filter polychromator designed for TS spectrum registration. A distinguishing feature of such a digital polychromator is the use of analog-to-digital converter (ADC) having analog memory with discretization frequency 5GHz and 12-bit sampling. The low heat dissipation and compact form factor of such ADC allow to equip spectral unit with registration and data handling system, assembling standalone device. Presented device suggests the only optical output interface providing calculated electron density and temperature. The polychromator test was performed at the Globus-M tokamak using two probing lasers: Nd:YAG 1064 nm and Nd:Glass 1055 nm operating with pulse energy up to 2J and FWHM 4 and 40 ns, respectively. Fast ADCs allows to perform signals digitizing in oscilloscope mode and demonstrates opportunity of stray signal separation despite on moderate size of vacuum chamber ~1 m and closely fitting walls. Results of first experiments and comparative analysis with routine TS polychromators are also presented.

Key words: plasma diagnostics, high-temperature plasma, Thomson scattering, polychromator.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-1-5-13

ВВЕДЕНИЕ

Для исследований физики процессов удержания, нагрева и устойчивости плазмы в токамаках необходимы методы локальных измерений температуры и концентрации электронов, одним из самых надёжных явля-

ется томсоновское рассеяние (ТР) на свободных электронах. Бесконтактность, точность, локальность, высокое пространственное и временное разрешение при минимуме модельных предположений — основные достоинства диагностики ТР, делающие её незаменимой при измерениях в высокотемпературной плазме токамака. Изучение внутренних транспортных барьеров, L—H-переходов, с помощью диагностики ТР подразумевает использование мощных твердотельных лазеров и светосильных спектральных приборов, обеспечивающих хорошее пространственное разрешение. Одним из наиболее популярных способов регистрации контуров рассеяния является использование фильтровых полихроматоров с широкими спектральными каналами, так как они позволяют проводить достоверную регистрацию спектров при относительно низкой энергии зондирующего лазера (рис. 1) [1]. Спектрометры данного типа используются на большинстве ведущих токамаков мира [2—5] и предлагаются к использованию на токамаке-реакторе ИТЭР [6, 7]. Представленный в данной статье прибор совмещает в себе как оптическую, так и регистрирующую часть и является новой ступенью развития фильтровых полихроматоров.

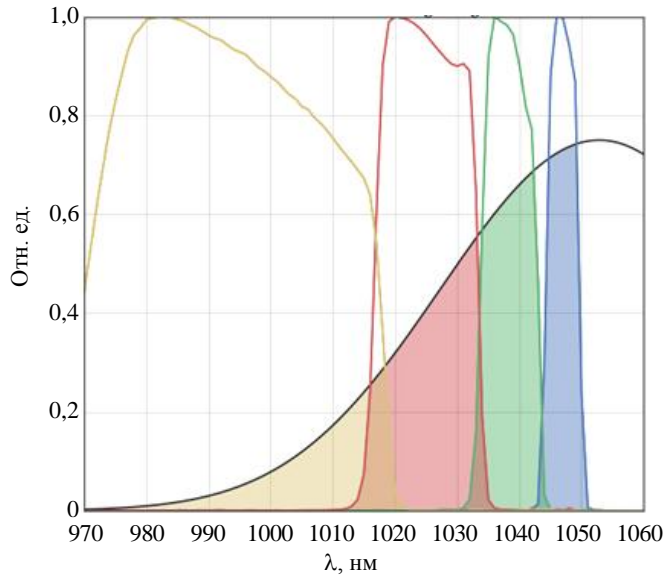


Рис. 1. Спектральные характеристики каналов полихроматора в сравнении со спектром ТР для 100 эВ

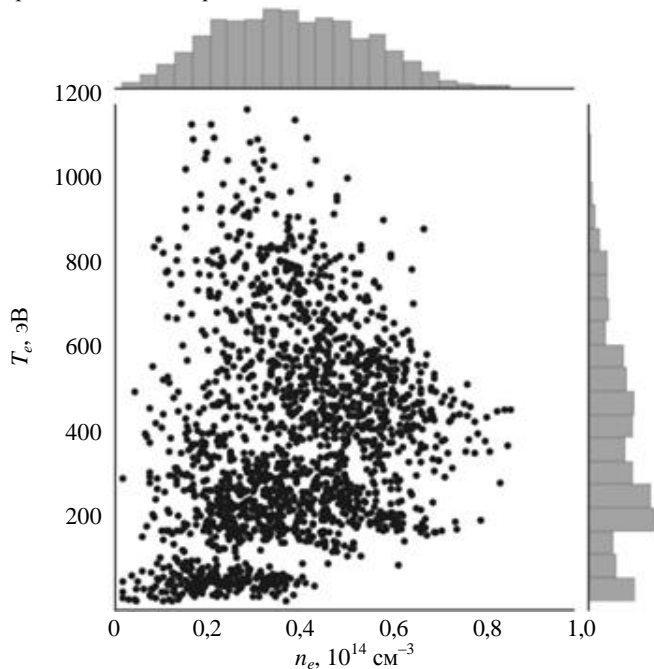


Рис. 2. Карта локальных значений n_e и T_e , полученных на токамаке Глобус-М

которые позволяют работать в осциллографическом режиме обработки сигнала. Данный режим работы облегчает разделение во времени сигналов рассеяния из плазмы и паразитного излучения, отражённого от элементов конструкции. Подробно будут рассмотрены методика обработки данных, калибровки прибора и его испытания в эксперименте.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Принципы измерения n_e и T_e не требуют привлечения сложных модельных предположений. Рассеянное на свободных электронах излучение собирается объективом, в фокальной поверхности которого

Работа посвящена описанию результатов первых испытаний прибора, совмещающего в себе как оптическую, так и регистрирующую часть на токамаке Глобус-М в составе диагностики ТР плазменного шнура. Токамак Глобус-М имеет следующие параметры: большой радиус $R = 0,36$ м, малый радиус $a = 0,24$ м, тороидальное магнитное поле $B_T = 0,4$ Т, ток плазмы 200 кА [8]. При этом локальные значения электронной температуры (T_e) в различных точках плазменного шнура ($r/a = 0—0,85$) лежат в диапазоне от 20 эВ до 1,5 кэВ, электронной концентрации (n_e) от $5 \cdot 10^{12}$ до $2 \cdot 10^{14}$ см⁻³ (рис. 2). В диагностике ТР на токамаке Глобус-М [9] основным зондирующим источником является Nd:Glass-лазер, позволяющий формировать последовательность импульсов (до 20 импульсов) с частотой до 3 кГц, со средней энергией 2 Дж и длительностью ~30—50 нс на длине волны генерации 1055 нм [10]. В настоящее время для диагностирования плазмы на токамаке Глобус-М вводится в эксплуатацию лазер Nd:YAG 1064 нм/100 Гц/2 Дж с шириной импульса на полувысоте 4 нс. В диагностике томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М используются фильтровые полихроматоры, оснащённые детекторами на основе лавинных фотодиодов (ЛФД).

Оцифровка производится с помощью высокоскоростных АЦП CAEN DT5742 (2—5 ГГц) [11], которые позволяют работать в осциллографическом режиме обработки сигнала. Данный режим работы облегчает разделение во времени сигналов рассеяния из плазмы и паразитного излучения, отражённого от элементов конструкции. Подробно будут рассмотрены методика обработки данных, калибровки прибора и его испытания в эксперименте.

Оцифровка производится с помощью высокоскоростных АЦП CAEN DT5742 (2—5 ГГц) [11],

находятся входные торцы волоконных жгутов, распределяющие излучение по полихроматорам. Концентрация электронов определяется из общего количества фотонов, попавших в каналы полихроматора, температура находится из доплеровского уширения рассеянного излучения (см. рис. 1). Каждый канал полихроматора оснащён трансимпедансным усилителем на базе транзисторов с высокой электронной подвижностью и с ЛФД диаметром 1,5 мм. Данный тип усилителя имеет два выхода: высокочастотный для измерения сигналов рассеяния и низкочастотный для калибровки, способный измерять квазипостоянные сигналы. Оцифровка производится АЦП с динамической памятью на чипе DRS4, позволяющем оцифровывать сигнал с частотой 5 ГГц и разрядностью 12 бит. Данный подход позволяет отделить от полезного сигнала ТР, задержанные по времени паразитные сигналы рассеяния на элементах внутри вакуумной камеры и оценить интенсивность фоновой засветки из предыстории сигнала.

Количество фотоэлектронов в каждом канале находится в соответствии с формулой

$$N_{\text{EXP}}^i = \frac{\int U_{\text{signal}}^i dt}{MGR_f e}, \quad (1)$$

где U_{signal}^i — оцифрованный сигнал; τ — ширина лазерного импульса; M — коэффициент усиления ЛФД; G — коэффициент усиления дополнительных усилительных каскадов; R_f — сопротивление обратной связи трансимпедансного усилителя; e — заряд электрона.

Кинетические параметры плазмы — плотность и температура электронов — находятся с помощью минимизации функции χ^2 , т.е. мы минимизируем разницу между экспериментальными и модельными значениями, подбирая n_e и T_e :

$$\chi^2 = \sum_i \frac{1}{(\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i)^2} (N_{\text{EXP}}^i - N_{\text{NUM}}^i)^2, \quad (2)$$

где N_{EXP}^i — экспериментальное значение фотонов; N_{NUM}^i — модельное значение фотонов для заданных T_e и n_e ; $\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i$ — ошибка измерения числа фотоэлектронов в i -м спектральном канале. Итеративная минимизация позволяет найти наиболее вероятные значения n_e и T_e .

Выражение для модельного значения фотоэлектронов в i -м канале может быть записано как

$$N_{\text{NUM}}^i = n_e AL\Omega E_L \frac{\lambda_0}{hc} \int_{\lambda_{\text{MIN}}^i}^{\lambda_{\text{MAX}}^i} \sigma_{\text{TS}}(T_e) QE^i K^i d\lambda, \quad (3)$$

где n_e — электронная плотность; L — длина рассеяния; Ω — телесный угол; E_L — энергия лазерного импульса; λ_0 — лазерная длина волны; h — постоянная планка; c — скорость света; $\lambda_{\text{MIN}}, \lambda_{\text{MAX}}$ — границы спектрального канала; σ_{TS} — сечение томсоновского рассеяния; QE — квантовая эффективность ЛФД; K — спектральная характеристика канала; A — коэффициент абсолютной калибровки.

Ошибки измерений электронной температуры и концентрации вычисляются по алгоритму, описанному в работе [6]:

$$\sigma_{T_e} \approx \left[\Sigma \left(\frac{N_{\text{EXP}}^i}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i} \right)^2 \left(\Sigma \left(\frac{N_{\text{EXP}}^i}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i} \right)^2 \Sigma \left(\frac{\partial N_{\text{NUM}}^i}{\partial T_e} \frac{1}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i} \right)^2 - \Sigma \left(\frac{\partial N_{\text{NUM}}^i}{\partial T_e} N_{\text{EXP}}^i}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^{i2}} \right)^2 \right)^{-1} \right]^{0.5}; \quad (4)$$

$$\sigma_{n_e} \approx n_e \left[\Sigma \left(\frac{\partial N_{\text{NUM}}^i}{\partial T_e} \frac{1}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i} \right)^2 \left(\Sigma \left(\frac{N_{\text{EXP}}^i}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i} \right)^2 \Sigma \left(\frac{\partial N_{\text{NUM}}^i}{\partial T_e} \frac{1}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^i} \right)^2 - \Sigma \left(\frac{\partial N_{\text{NUM}}^i}{\partial T_e} N_{\text{EXP}}^i}{\sigma_{N_{\text{EXP}}}^{i2}} \right)^2 \right)^{-1} \right]^{0.5}. \quad (5)$$

Суммирование ведётся по числу каналов. Ошибка измерения числа фотоэлектронов определяет ошибку измерения температуры и концентрации, поэтому требуется вычислять точное значение диспер-

сии количества детектируемых фотоэлектронов в каждом канале, которая может быть вычислена в соответствии с выражением

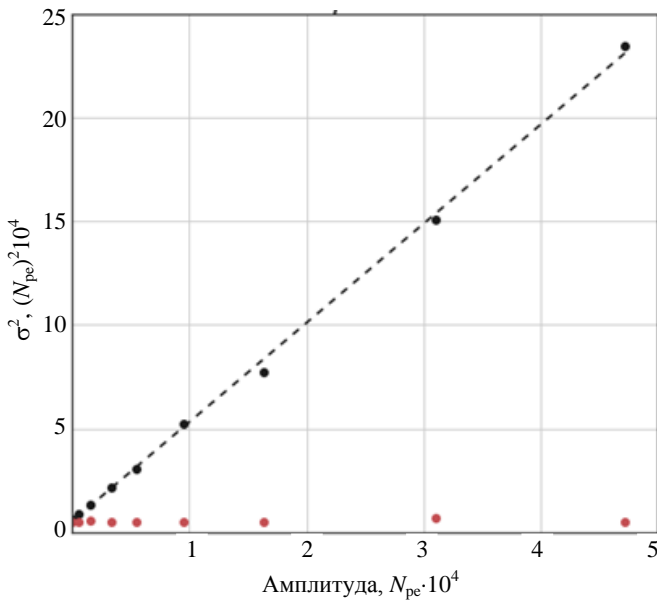


Рис. 3. Зависимость квадрата дисперсии от амплитуды зарегистрированного сигнала в стендовом эксперименте: • — зависимость дисперсии от количества фотоэлектронов; • — измерения квазипостоянного шума, усреднённые по серии измерений

необходима для определения температуры электронов, её цель — определение относительной чувствительности спектральных каналов.

Для определения концентрации электронов необходимо знать коэффициент соответствия между числом рассеянных фотонов и величиной детектируемого сигнала, т.е. система должна быть откалибрована абсолютно.

Абсолютная калибровка производится по сигналам рамановского рассеяния (РР), по методике, описанной в работе [13]. Детектировалось рассеянное излучение от лазера Nd:Glass. Сечение РР для азота показано на рис. 4. Как видно, сигнал РР смещён по спектру относительно зондирующего излучения и должен регистрироваться в каналах полихроматора аналогично сигналам ТР. Камера заполнялась азотом, и при давлении от 0,03 до 10 торр наблюдались сигналы РР, для каждого давления было проведено около 100 измерений. Результаты показаны на рис. 5, где на графике изображены результаты эксперимента, а усы отражают дисперсию. Полученная зависимость амплитуды сигнала от давления газа ли-

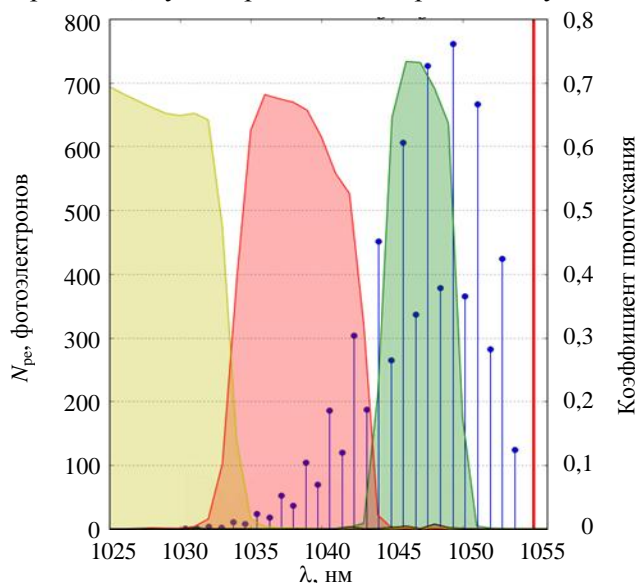


Рис. 4. Сечение РР для N_2 (синий) в сравнении с характеристиками спектральных каналов полихроматора

$$\sigma_{N_{EXP}}^i = \sqrt{F_{\text{эф}}^i N_{EXP}^i + \sigma_0^{i2}},$$

где $F_{\text{эф}}^i$ — коэффициент избыточного шума [12]; N_{EXP}^i — количество фотоэлектронов, детектированных в i -м канале; σ_0^i — суммарный шум фонового квазипостоянного излучения.

Коэффициент избыточного шума измерялся в стендовом эксперименте: приёмники освещались стабильным источником света и измерялась зависимость квадрата дисперсии от количества фотоэлектронов. Результаты представлены на рис. 3, получен эффективный коэффициент избыточного шума $F_{\text{эф}}^i \sim 4,7$, что близко к паспортному значению $F = 4$.

ИСПЫТАНИЯ ПОЛИХРОМАТОРА

Для проведения измерений каждый полихроматор должен быть откалиброван. Для диагностики ТР проводят две калибровки: относительную и абсолютную. Относительная калибровка

необходима для определения температуры электронов, её цель — определение относительной чувствительности спектральных каналов.

Для определения концентрации электронов необходимо знать коэффициент соответствия между числом рассеянных фотонов и величиной детектируемого сигнала, т.е. система должна быть откалибрована абсолютно.

Абсолютная калибровка производится по сигналам рамановского рассеяния (РР), по методике, описанной в работе [13]. Детектировалось рассеянное излучение от лазера Nd:Glass. Сечение РР для азота показано на рис. 4. Как видно, сигнал РР смещён по спектру относительно зондирующего излучения и должен регистрироваться в каналах полихроматора аналогично сигналам ТР. Камера заполнялась азотом, и при давлении от 0,03 до 10 торр наблюдались сигналы РР, для каждого давления было проведено около 100 измерений. Результаты показаны на рис. 5, где на графике изображены результаты эксперимента, а усы отражают дисперсию. Полученная зависимость амплитуды сигнала от давления газа ли-

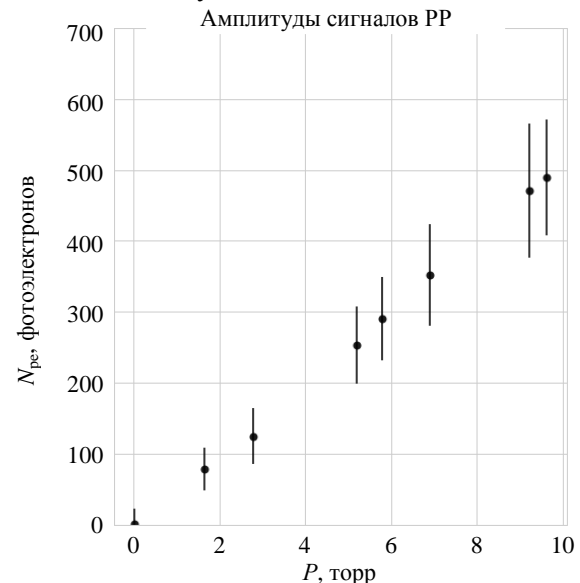


Рис. 5. Сигналы РР, измеренные во 2-м канале прибора при разном давлении азота

нейна. Дисперсия экспериментальных точек предоставляет информацию о суммарной точности измерений для сигналов разной интенсивности, которая включает в себя статистический шум сигнала и суммарный шум внутреннего усиления ЛФД и последующего усилительного тракта, что может быть использовано для верификации стендовых измерений характеристики статистических шумов детектора.

Стоит отметить, что для сигналов, соответствующих 120 детектируемым фотоэлектронам и более, дисперсия результатов измерений совпадает с ожидаемой статистической ошибкой, полученной из оценок пуассоновского шума фотоэлектронов на основании стендовых измерений. Влияние шумов усилителя при регистрации сигналов более 120 фотоэлектронов становится пренебрежимо мало.

Одной из проблем при использовании диагностики ТР является отражённо-рассеянное излучение лазера на зондирующей длине волны (так называемое паразитное рассеяние). Несмотря на высокий уровень режекции фильтрами полихроматора паразитно-рассеянного излучения, его интенсивность может быть столь высока, что появляются сигналы в каналах полихроматора, спектрально разнесённые с длиной волны зондирующего излучения. При использовании лазера с зондирующей длиной волны $\lambda = 1055$ нм наблюдается паразитная засветка отражённо-рассеянным излучением в первом спектральном канале ($\lambda = 1049\text{—}1043$ нм), которая усложняет измерения низких температур и сигнала РР. Использование высокоскоростной оцифровки сигнала позволяет разрешить временную последовательность сигналов рассеяния и паразитного сигнала из-за запаздывания последнего. Для эффективной фильтрации «паразитного» сигнала требуется знать форму лазерного импульса (f) и минимизировать разницу между суммой двух лазерных импульсов (сигналом рассеяния и «паразитным» сигналом) и экспериментальным сигналом (S). Данная процедура оптимизации позволяет найти амплитуды (A_1 и A_2) и положение сигналов (c_1 и c_2). Форма импульса не изменяется при оптимизации:

$$\min \sum_i (A_1 \cdot f(t_i + c_1) + A_2 \cdot f(t_i + c_2) - S(t_i))^2 \longrightarrow A_1, A_2, c_1, c_2. \quad (6)$$

На плазме токамака Глобус-М были проведены первые испытания прибора (полихроматора), вмещающего в себе как оптическую, так и регистрирующую часть, при его использовании в составе аппаратуры ТР.

Полихроматор регистрировал излучение из пространственной точки с координатами $R = 21$ см, что соответствует области $r/a \sim 0,75$ со стороны сильного магнитного поля, и использовался для измерения температуры и концентрации плазмы. В начале были проверены частотно-временные характеристики полихроматора и его способность регистрировать сигналы в осциллографическом режиме. Для этого использовались два лазера с различной длительностью импульса, отличающейся в 10 раз (40 и 4 нс) и немного различающейся по длине волны генерации $\lambda = 1055$ и $\lambda = 1064$ нм. Характерные осциллограммы сигналов рассеяния, зарегистрированных в первом канале полихроматора, показаны на рис. 6, 7. Сигналы рассеяния излучения лазера с длиной волны генерации $\lambda = 1064$ нм регистрируются при усиленном фоне отражённо-рассеянного света, индуцированного путём установки матового экрана вместо лазерной ловушки. Благодаря высокоскоростной оцифровке с частотой ~ 5 ГГц и адекватным частотно-

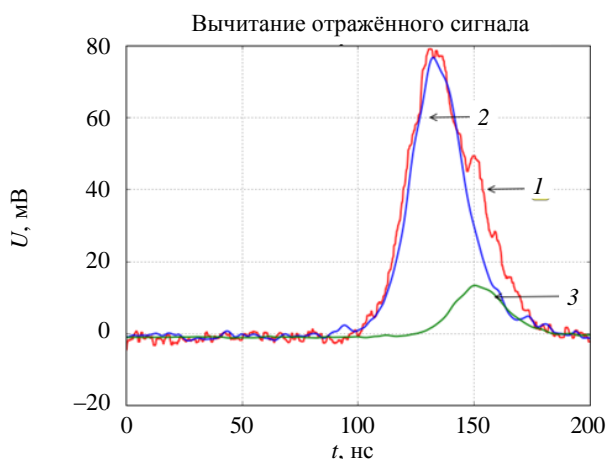


Рис. 6. Пример сигнала лазера (1055 нм): 1 — записанный сигнал; 2 — вычисленный сигнал рассеяния; 3 — вычисленный отражённый сигнал

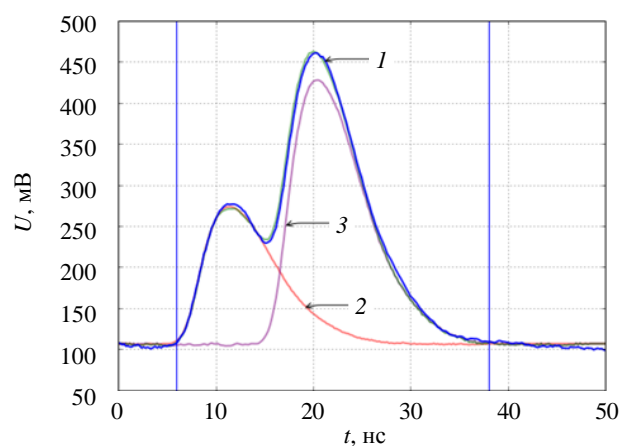


Рис. 7. Пример сигнала лазера (1064 нм): 1 — записанный сигнал; 2 — вычисленный сигнал рассеяния; 3 — вычисленный отражённый сигнал

временным характеристикам усилителей на осциллограммах можно отчётливо увидеть и разделить сигналы рассеяния и отражённый фоновый (паразитный) сигнал. Использование разных лазеров (длительность импульса 40 и 4 нс) требовало некоторого времени на перестройку зондирующей оптики, поэтому было невозможно использовать соседние разряды токамака с полностью идентичными параметрами. На рис. 8 (сверху вниз) представлены осциллограммы тока разряда, линейной плотности плазмы и временной ход температуры плазмы, полученный без учёта сигнала первого канала полихроматора. Как видно на рисунке, в схожих разрядах с сильно различающимися по длительности лазерными импульсами получены схожие значения временного хода температуры.

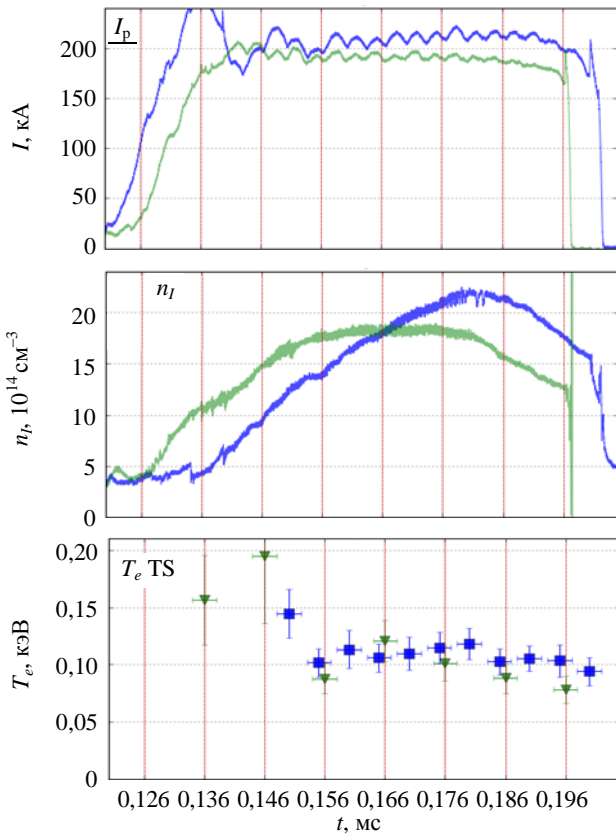


Рис. 8. Характерные разряды: ■ — разряд № 36 722, измерения с $\lambda_{\text{лазер}} = 1055$ нм; ▼ — разряд № 36 761, измерения с $\lambda_{\text{лазер}} = 1064$ нм

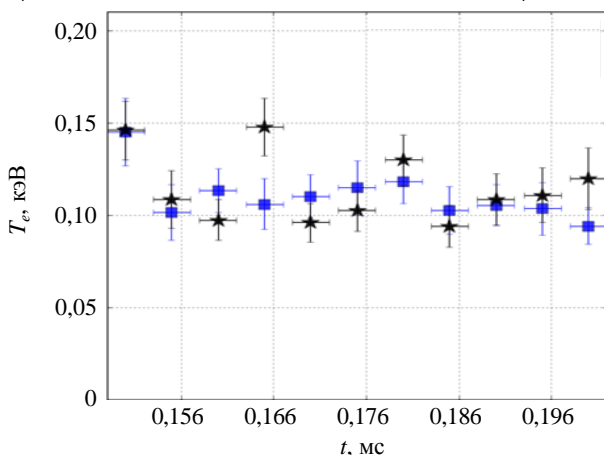


Рис. 9. Вычитание отражённого сигнала, измерения с $\lambda_{\text{лазер}} = 1055$ нм: ■ — измерения без учёта сигнала в первом канале; ★ — измерения с вычтенным отражённым сигналом

корректности вычитания паразитного сигнала осуществлялась следующим образом: выбирался разряд с достаточно большой электронной температурой (~100 эВ) в точке измерения (см. рис. 8), данная температура определялась как без использования информации в первом канале, так и используя первый канал с вычтенным паразитным сигналом. На рис. 9 можно увидеть, что результаты совпадают с точностью до ошибки измерений. Проведённые измерения показали высокую результативность метода вычитания пара-

зитного сигнала. Вторая часть испытаний включала в себя использование полихроматора в составе аппаратуры ТР токамака Глобус-М [9] в систематических измерениях профилей температуры и концентрации. При этом обработка сигнала позволяла определять параметры плазмы как в стандартной процедуре обработки, так и при вычитании паразитной части из сигнала первого рабочего канала. Стандартная процедура подразумевает отбрасывание сигнала первого канала из измеренного спектра при высоком значении паразитного сигнала. Измерения температуры и концентрации электронов в процессе испытаний полихроматора проводились с помощью лазера с длительностью 40 нс, входящего в состав аппаратуры ТР, хотя, как следует из рис. 7, процедура вычитания паразитного сигнала более эффективна для лазера с длительностью 4 нс ($\lambda = 1064$ нм), так как импульс у него короче в 10 раз. Сигналы из второго канала полихроматора не детектируют «паразитное» излучение, поэтому повторяют форму лазерного импульса. На рис. 9 приведён временной ход температуры в пространственной точке плазменного шнура $R = 21$ см в разряде № 36 722. Синие точки соответствуют значениям T_e , полученным без учёта сигнала первого канала (стандартная процедура), чёрные точки — значениям, полученным после вычитания паразитного сигнала. Как видно, процедура вычитания работает удовлетворительно даже для случая с температурой около 100 эВ (см. рис. 1).

В завершение проверки частотно-временных характеристик полихроматора были проведены измерения температуры электронов в двух разрядах с похожими характеристиками. Проверка

зитного сигнала при измерениях низких температур, когда значительная часть информации содержится в первом канале полихроматора.

На рис. 10, 11 изображены профили электронной концентрации и температуры, измеренные в разряде № 36 706 в различные моменты времени. Синими точками изображены данные, полученные экваториальной системой, красными точками — данные, полученные с применением цифрового полихроматора. Характерная точность измерений сигналов составляла 2—5%.

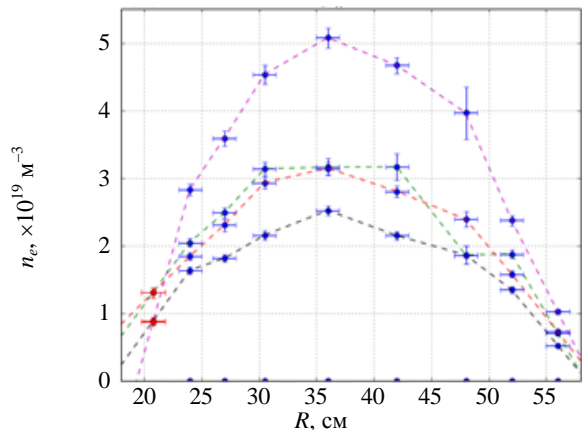


Рис. 10. Профиль электронной концентрации в разряде № 36 706, полученные данные экваториальной системой (•), цифровым полихроматором (•)

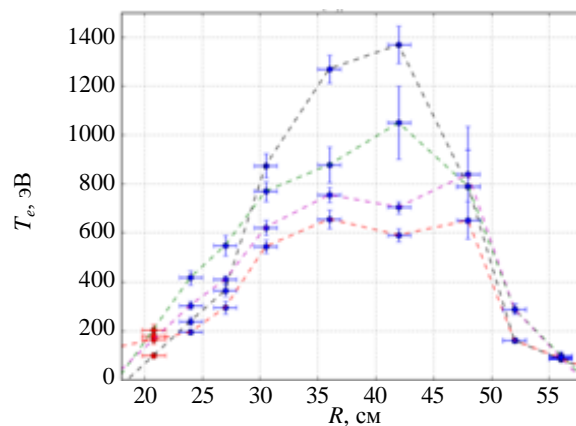


Рис. 11. Профиль электронной температуры в разряде № 36 706, полученные данные экваториальной системой (•), цифровым полихроматором (•)

Основными источниками шума в спектральных приборах являются пуассоновские шумы фонового излучения для широких спектральных каналов и суммарные пуассоновские рассеянного сигнала и фонового излучения для узких спектральных каналов.

ВЫВОДЫ

Проведены испытания прототипа цифрового фильтрового полихроматора, совмещающего в себе как оптическую, так и регистрирующую часть, в составе аппаратуры ТР на токамаке Глобус-М. Система регистрации прибора основана на ЛФД с диаметром чувствительной площадки 1,5 мм и трансимпедансном усилителе на базе транзисторов с высокой электронной подвижностью. Было проведено измерение шумовых параметров регистрирующей системы, в ходе которой было установлено, что при отсутствии фоновой засветки точность определения сигналов интенсивностью свыше 120 фотоэлектронов является статистическим шумом самого сигнала.

В ходе испытаний была продемонстрирована возможность использования временной отстройки от отражённо-паразитного сигнала при наличии высокоскоростной оцифровки. Цифровой полихроматор в течение экспериментальной кампании на токамаке Глобус-М применялся для измерения температуры и концентрации электронов со стороны сильного магнитного поля в области $r/a \sim 0,75$ в серии разрядов при различной средней плотности плазмы и при различных длинах волн зондирующего излучения. Полученные значения температуры находятся в диапазоне 50—200 эВ и дополняют данные, полученные от основной системы.

Г.С. Курскиев выражает благодарность за поддержку РФФИ, грант № 16-32-60114 мол_а_дк.

REFERENCES

1. Carlstrom T.N. et al. A compact, low cost, seven channel polychromator for Thomson scattering measurements. — Rev. Sci. Instrum., 1990, vol. 61, p. 2858.
2. Carlstrom T.N. et al. Design and operation of the multipulse Thomson scattering diagnostic on DIII-D. — Rev. Sci. Instrum., 1992, vol. 63, p. 4901.
3. Pasqualotto R. et al. High resolution Thomson scattering for Joint European Torus (JET). — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, p. 3891.

4. **Scannell R. et al.** Design of a new Nd:YAG Thomson scattering system for MAST. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, vol. 79, p.10E730.
5. **Le Blanc B.P. et al.** Operation of the NSTX Thomson scattering system. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, vol. 74, p. 1659.
6. **Kurskiv G.S. et al.** A study of core Thomson scattering measurements in ITER using a multi-laser approach. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, p. 053024.
7. **Mukhin E.E. et al.** Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER. — *Nucl. Fusion*, 2014, vol. 54, p. 043007.
8. **Gusev V.K. et al.** Spherical tokamak Globus-M. — *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Journal of technical physics)*, 1999, vol. 69, issue 9 (in Russian).
9. **Kurskiv G.S. et al.** Thomson scattering diagnostics upgrade at the Globus-M tokamak. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2012, issue 2, p. 81 (in Russian).
10. **Tolstyakov S.Yu. et al.** Thomson scattering diagnostics in the Globus-M tokamak. — *Technical Physics*, 2006, vol. 51, № 7, pp. 846—852.
11. <http://www.caen.it/>.
12. **Teich M. et al.** Excess noise factors for conventional and superlattice avalanche photodiodes and photomultiplier tubes. — *IEEE J. of Quantum Electronics*, 1986, vol. 22, № 8, p. 1184.
13. **Le Blanc B.P.** Thomson scattering density calibration by Rayleigh and rotational Raman scattering on NSTX. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, vol. 79, p. 10E737.

AUTHORS

Solokha V.V. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia; Peter the Great Saint-Petersburg State Polytechnical University, Politechnicheskaya st. 29, 195251, St. Petersburg, Russia

Kurskiv G.S. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia; gleb.kurskiv@gmail.com

Mukhin E.E. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia; E.Mukhin@mail.ioffe.ru

Tolstyakov S.Yu. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Bazhenov A.N. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia; Peter the Great Saint-Petersburg State Polytechnical University, Politechnicheskaya st. 29, 195251, St. Petersburg, Russia

Petrov Yu.V. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Gusev V.K. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Sakharov N.V. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Babinov N.A. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Bukreev I.M. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Dmitriev A.M. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Kochergin M.M. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Koval A.N. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Litvinov A.E. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Masyukevich S.V. JSC «Spectral-Tech», Kurchatova ul. 10, office 40B, 194223 St. Petersburg, Russia

Razdobarin A.G. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Samsonov D.S. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Semenov V.V. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Solovey V.A. A.F. Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Politechnicheskaya ul. 26, 194021 St. Petersburg, Russia

Chernakov P.V. JSC «Spectral-Tech», Kurchatova ul. 10, office 40B, 194223 St. Petersburg, Russia

Chernakov A.I.P. JSC «Spectral-Tech», Kurchatova ul. 10, office 40B, 194223 St. Petersburg, Russia

Chernakov An.P. JSC «Spectral-Tech», Kurchatova ul. 10, office 40B, 194223 St. Petersburg, Russia

Received 16 January 2017
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol. 40, issue 1, pp. 5—13.