

04.2

Диагностика томсоновского рассеяния для управления концентрацией плазмы токамака Глобус-М2

© Н.С. Жильцов¹, Г.С. Курский¹, В.А. Соловей², В.К. Гусев¹, А.А. Кавин³, Е.О. Киселёв¹, В.Б. Минаев¹, Е.Е. Мухин¹, Ю.В. Петров¹, Н.В. Сахаров¹, В.В. Солоха¹, А.Н. Новохацкий¹, Е.Е. Ткаченко¹, С.Ю. Толстяков¹, Е.А. Тюхменева¹

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

² Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

³ АО „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nisovru@gmail.com

Поступило в Редакцию 11 мая 2023 г.

В окончательной редакции 7 июня 2023 г.

Принято к публикации 7 июня 2023 г.

Описано применение диагностики томсоновского рассеяния в режиме реального времени для управления концентрацией плазмы. Проведена модернизация системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния сферического токамака Глобус-М2, обеспечивающая обработку сигналов лазерного рассеяния из 11 пространственных точек в реальном времени с задержкой менее 2.4 ms. Достигнутая скорость обработки данных соответствует требованиям к системам регистрации диагностики томсоновского рассеяния современных термоядерных установок, в том числе проекта ИТЭР. Продемонстрировано использование сигналов диагностики томсоновского рассеяния в системе управления токамака.

Ключевые слова: токамак, диагностика томсоновского рассеяния, система реального времени.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.16.55961.19625

Диагностика плазмы методом томсоновского рассеяния (ТР) лазерного излучения — общепризнанный способ [1–3] надежного измерения динамики пространственных распределений электронной температуры $T_e(R, t)$ и концентрации $n_e(R, t)$ в плазме токамаков и стеллараторов. При реконструкции магнитной конфигурации плазменного шнура с помощью таких равновесных кодов, как EFIT [4], PET [5] и др., применение данных диагностики ТР позволяет уточнить положение границ плазмы и магнитной оси. Используя данные ТР, можно определить энергию W_e , запасенную электронным компонентом плазмы, и отношение давления электронов к давлению магнитного поля β_e . Получение этой информации в режиме реального времени (RT) необходимо для предотвращения аварийных ситуаций, связанных со срывом тока плазмы [6]. Диагностика ТР в режиме реального времени также требуется для реализации перспективных схем управления профилями концентрации, тока, электронной и ионной температур плазмы для оптимизации выхода реакции термоядерного синтеза в токамаках-реакторах [7,8]. На токамаке ИТЭР именно диагностика ТР призвана обеспечить обратную связь для управления гибридными режимами [6]. Одной из приоритетных задач российского проекта TRT (токамак с реакторными технологиями) [9,10] также является реализация управления профилями различных параметров плазмы, для решения этой задачи перспективно использование диагностики ТР [11].

В 2020 г. на токамаке Глобус-М2 был введен в эксплуатацию новый диагностический комплекс ТР [12],

соответствующий основным требованиям к диагностическим ТР ИТЭР. Комплекс позволяет проводить измерения в стационарном режиме с частотой 330 Hz. Для анализа спектра рассеянного излучения используется 11 пятиканальных полихроматоров на основе интерференционных светофильтров. В качестве детекторов применяются лавинные фотодиоды, оснащенные трансимпедансным усилителем с широкой полосой пропускания (> 250 MHz) [13]. Для регистрации интенсивности лазерного рассеяния в зависимости от времени используются восемь VME-модулей дигитайзера CAEN V1743 по 16 каналов с разрешением 12 bit и частотой дискретизации 3.2 GS/s. Все восемь дигитайзеров парно подключены к одному четырехканальному PCI-e контроллеру CAEN A3818C компьютера системы сбора. Каждый предусилитель лавинного фотодиода имеет два высокочастотных выхода, различающихся коэффициентами усиления, предназначенных для увеличения динамического диапазона измеряемых сигналов. За импульс лазера (одну временную точку) регистрируются 110 осциллограмм сигналов томсоновского рассеяния, а также восемь осциллограмм временной формы зондирующего лазерного импульса (по одной для каждого модуля V1743). Компьютер находится под управлением операционной системы (ОС) общего назначения Windows 10 и оснащен шестиядерным центральным процессором AMD Ryzen 5 3600X. Программа сбора и обработки данных написана на языке C++ и выполняется с наивысшим приоритетом в планировщике задач ОС. Для переноса данных из буфера дигитайзеров в оператив-

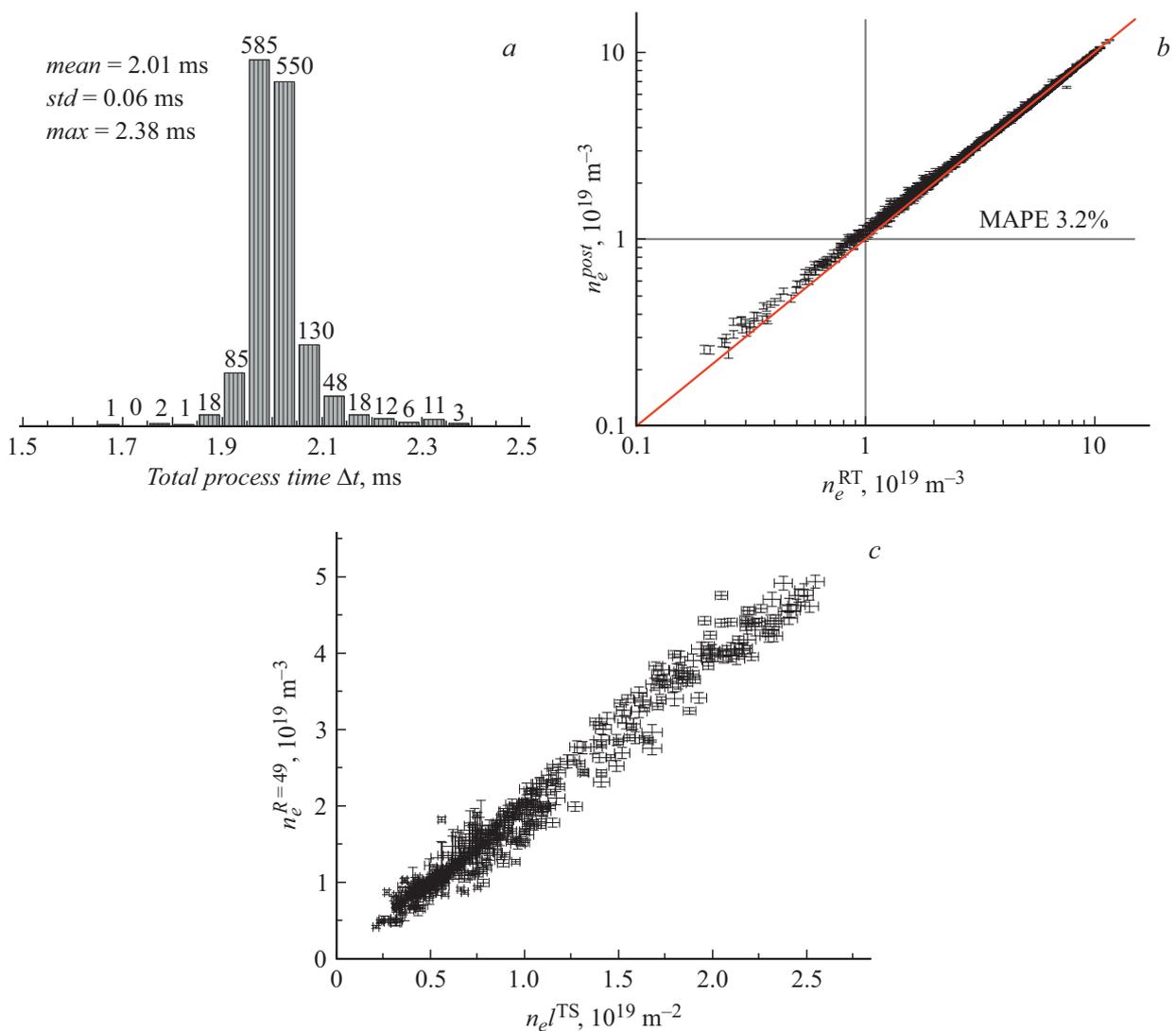


Рис. 1. *a* — гистограмма времени обработки сигнала ТР от момента зондирования плазмы до обновления регистров на исполняющем ЦАП (числа соответствуют количеству событий, попавших в данный интервал времени); *b* — локальная концентрация n_e , полученная в результате постобработки (ось ординат), и n_e , полученная в результате обработки упрощенным кодом в реальном времени (ось абсцисс); *c* — локальное значение концентрации в точке с большим радиусом $R = 49$ см в зависимости от линейной концентрации.

ную память компьютера выделено по одному потоку на каждую из четырех линий связи с дигитайзерами. Пятый вычислительный поток выделен на обработку и определение числа зарегистрированных фотоэлектронов в каждой из 128 записанных осциллограмм ($11 \cdot 5 \cdot 2$ сигналов ТР + 8 сигналов синхронизации + 10 холостых каналов). После обработки всех каналов формируется управляющий сигнал обратной связи, который в виде UDP-пакета передается по сети Ethernet. После прохождения через два коммутатора управляющий сигнал попадает на одноплатный компьютер Raspberry Pi 4B и конвертируется в команду для цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) 12 bit MCP4725, подключенного к последовательной шине I2C. ЦАП выводит сигнал в общую систему сбора данных токамака и в систему

управления токамака. Для демонстрации применения диагностики ТР в системе управления токамака в качестве управляемого параметра была выбрана средняя концентрация электронов, а в качестве исполняющего устройства использован пьезоклапан MaxTec MV-112, регулирующий поток водорода в камеру.

Для расчета профиля n_e в режиме реального времени разработан упрощенный алгоритм обработки данных ТР. На рис. 1, *a* приведена гистограмма времени работы цикла расчета в серии разрядов токамака. Измерялось время обработки с учетом оцифровки данных, передачи их в память компьютера, расчета профиля n_e и передачи управляющего сигнала на ЦАП. Среднее время составило 2.01 ms, а максимальное время не превышало 2.38 ms, интервал между лазерными импульсами 3.03 ms.

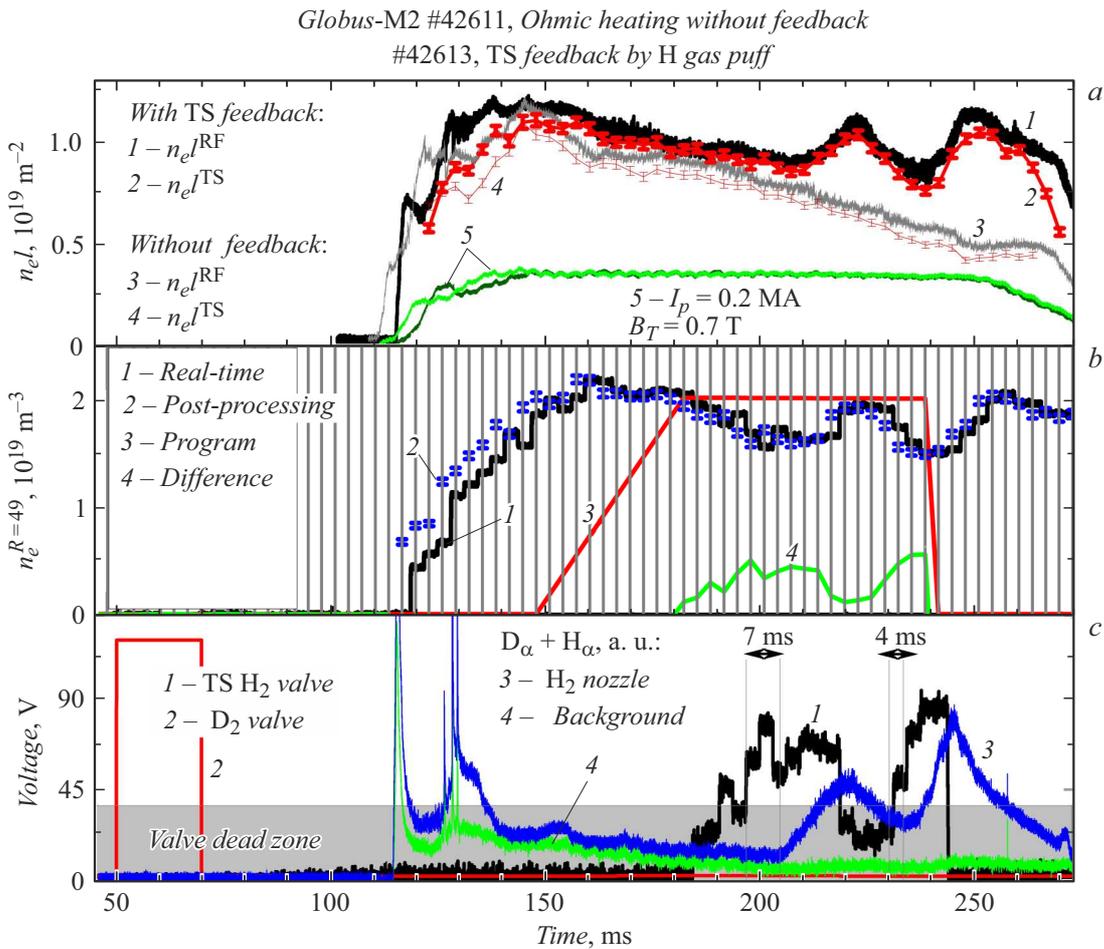


Рис. 2. *a* — интегральная концентрация, полученная с помощью СВЧ-интерферометра (1, 3) и методом ТР (2, 4). 5 — ток плазмы. *b* — измеренная локальная концентрация $n_e^{R=49}$: выход ЦАП в режиме реального времени (1) и результаты постобработки (2). 3 — заданная программа управления концентрацией, 4 — разность заданного и измеренного значений. Вертикальными линиями показаны моменты зондирования. *c* — напряжение на пьезоклапане: 1 — в цепи обратной связи, 2 — на вспомогательном клапане. Область серого цвета — мертвая зона клапана. Суммарная интенсивность излучения линий H_α и D_α в разряде № 42613: 3 — для хорды наблюдения, направленной на капилляр газонапуска, 4 — для фонового сигнала.

На передачу данных из дигитайзера в компьютер тратится 1.2 ms, а из компьютера в исполняющий ЦАП — 0.5 ms, что в сумме составляет 85% от времени цикла. На рис. 1, *b* приведено сравнение результатов расчета локальных значений n_e с использованием стандартного алгоритма обработки экспериментальных данных (постобработка) и упрощенного алгоритма обработки данных ТР. Показано, что результаты двух алгоритмов обработки находятся в хорошем согласии друг с другом, а величина MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах) составляет 3.2%. Поскольку в настоящее время на токамаке Глобус-М2 данные о магнитном равновесии в режиме реального времени недоступны, для формирования управляющего параметра использовалось локальное значение концентрации $n_e^{R=49}$, измеренное в точке с большим радиусом $R = 49 \text{ cm}$ (близко к середине малого радиуса). Линейная зависимость $n_e^{R=49}$ от $n_e I^{\text{TS}}$ (рис. 1, *c*) позволяет использовать локальную концентрацию $n_e^{R=49}$

в качестве входного сигнала для пропорционального регулятора средней концентрации в выбранном режиме работы токамака.

Для демонстрации возможности управления средней концентрацией в токамаке на основании данных диагностики ТР был выбран омический режим с низкой средней концентрацией электронов ($< 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$) и предварительной боронизацией первой стенки. Для данного режима работы токамака Глобус-М2 не ожидается перехода в режим улучшенного удержания, сопровождающегося резким изменением коэффициента диффузии частиц, что позволяет использовать простую модель управления n_e пропорциональным регулятором. В сценарии использовался короткий импульс напуска дейтерия через отдельный клапан за 50 ms до старта разряда для формирования условий пробоя. На рис. 2 приведены основные параметры плазмы для двух разрядов токамака Глобус-М2: разряда № 42613 с включенной системой управления

концентрацией и контрольного разряда № 42611 без управления. Все программы управления электромагнитной системой в данных разрядах были идентичными. Начиная со 145 ms в динамике $n_e l$ (рис. 2, а) наблюдается монотонное снижение. Для измерения величины $n_e l$ использовались две независимые диагностики: методом ТР [14] и с помощью СВЧ-интерферометра (характерная длина хорды $l \approx 0.6$ м). В разряде № 42613 при снижении n_e , измеренной методом ТР, до заданной величины $n_e^{R=49} = 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (рис. 2, б) на клапан напуска рабочего газа подается управляющий сигнал (рис. 2, с), пропорциональный разнице заданной и измеренной n_e . Таким образом, в разряде с включенной системой управления n_e по сигналу обратной связи от системы диагностики ТР монотонное снижение $n_e l$ было подавлено.

Использование простого пропорционального контроллера вызвало колебания управляемой величины в окрестности заданного значения из-за инерции системы управления и объекта управления. Клапан, использованный в работе, имеет мертвую зону (рис. 2, с) и гистерезис, не учтенные при построении контроллера. Оценка задержки между открытием клапана и ионизацией газа на границе плазмы, сделанная по сигналу суммарной интенсивности излучения линий H_α и D_α (рис. 2, с), составила 4–7 ms.

На токамаке Глобус-М2 профиль концентрации, измеренный методом томсоновского рассеяния, обрабатывается в режиме реального времени для каждого плазменного разряда (начиная с декабря 2022 г.). Время от момента измерения до готовности полного профиля не превышает 2.4 ms, из которых 1.2 ms расходуется на передачу данных из дигитайзеров и 0.5 ms на передачу данных на исполняющий ЦАП. Достигнутое время быстрогодействия находится на мировом уровне [15–17] и удовлетворяет требованию 2.5 ms для включения диагностики ТР в систему управления параметрами плазмы ИТЭР [6]. Время обработки можно сократить до ~ 1 ms за счет оптимизации системы передачи данных. Дополнительное увеличение быстрогодействия возможно при использовании ОС реального времени и высокопроизводительного процессора. Показано соответствие между данными, измеряемыми в режиме реального времени, и результатами стандартной постобработки.

Обработка данных диагностики ТР в режиме реального времени реализована на ряде установок: KSTAR [18], NSTX-U [16,17], LHD [19,20], MAST [21,22], TCV [23] и DIII-D [24,25]. Использование данных диагностики ТР для управления параметрами плазмы упоминается только в работе [26] в рамках интегральной системы токамака DIII-D без каких-либо подробностей. Вместе с тем доступное в открытой печати описание диагностического комплекса ТР DIII-D [25,27] не содержит информацию о возможности работы в реальном времени, а более ранняя работа [24] упоминает обработку в реальном времени только как возможный апгрейд. В настоящей работе продемонстрировано управление средней концентрацией в токамаке на основании данных

диагностики ТР в омическом режиме с низкой средней концентрацией электронов ($< 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$). Возможно качественное улучшение точности поддержания средней концентрации за счет оптимизации алгоритма контроллера и управления пьезоклапаном напуска рабочего газа. Возможности диагностики ТР, созданной для токамака Глобус-М2, достаточны для реконструкции профиля тока плазмы равновесными кодами в режиме реального времени, для систем управления пространственными распределениями параметров плазмы в токамаке-реакторе и источнике нейтронов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Mattioli, *Incoherent light scattering from high temperature plasmas* (Euroatom/CEA, 1974).
- [2] P.E. Stott, G. Gorini, P. Prandoni, E. Sindoni, *Diagnostics for experimental thermonuclear fusion reactors 2* (Springer, N.Y., 1998). DOI: 10.1007/978-1-4615-5353-3
- [3] H.J. van der Meiden, J.W.M. Vernimmen, J. van den Berg, I.G.J. Classen, *J. Fusion Energy*, **39**, 251 (2020). DOI: 10.1007/s10894-020-00262-5
- [4] S.A. Sabbagh, S.M. Kaye, J. Menard, F. Paoletti, M. Bell, R.E. Bell, J.M. Bialek, M. Bitter, E.D. Fredrickson, D.A. Gates, A.H. Glasser, H. Kugel, L.L. Lao, B.P. LeBlanc, R. Maingi, R.J. Maqueda, E. Mazzucato, D. Mueller, M. Ono, S.F. Paul, M. Peng, C.H. Skinner, D. Stutman, G.A. Wurden, W. Zhu and NSTX Research Team, *Nucl. Fusion*, **41**, 1601 (2001). DOI: 10.1088/0029-5515/41/11/309
- [5] S.A. Galkin, A.A. Ivanov, S.Yu. Medvedev, Yu.Yu. Poshekhonov, *Nucl. Fusion*, **37**, 1455 (1997). DOI: 10.1088/0029-5515/37/10/I11
- [6] ITER System Requirements Documents for diagnostics (SRD-55) from DOORS (28B39L). Private communication.
- [7] X. Litaudon, E. Barbato, A. Bécoulet, E.J. Doyle, T. Fujita, P. Gohil, F. Imbeaux, O. Sauter, G. Sips, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46**, A19 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/5A/002
- [8] M.D. Boyer, D.J. Battaglia, D. Mueller, N. Eidictis, K. Erickson, J. Ferron, D.A. Gates, S. Gerhardt, R. Johnson, E. Kolemen, J. Menard, C.E. Myers, S.A. Sabbagh, F. Scotti, P. Vail, *Nucl. Fusion*, **58**, 036016 (2018). DOI: 10.1088/1741-4326/aaa4d0
- [9] А.В. Красильников, С.В. Коновалов, Э.Н. Бондарчук, И.В. Мазуль, И.Ю. Родин, А.Б. Минеев, Е.Г. Кузьмин, А.А. Кавин, Д.А. Карпов, В.М. Леонов, Р.Р. Хайрутдинов, А.С. Кукушкин, Д.В. Портнов, А.А. Иванов, Ю.И. Бельченко, Г.Г. Денисов, *Физика плазмы*, **47** (11), 970 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121110196 [A.V. Krasilnikov, S.V. Konovalov, E.N. Bondarchuk, I.V. Mazul', I.Yu. Rodin, A.B. Mineev, E.G. Kuz'min, A.A. Kavin, D.A. Karpov, V.M. Leonov, R.R. Khayrutdinov, A.S. Kukushkin, D.V. Portnov, A.A. Ivanov, Yu.I. Belchenko, G.G. Denisov, *Plasma Phys. Rep.*, **47**, 1092 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21110192].

- [10] В.М. Леонов, С.В. Коновалов, В.Е. Жоголев, А.А. Кавин, А.В. Красильников, А.Ю. Куянов, В.Э. Лукаш, А.Б. Минеев, Р.Р. Хайрутдинов, *Физика плазмы*, **47** (11), 986 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121120040 [V.M. Leonov, S.V. Konovalov, V.E. Zhogolev, A.A. Kavin, A.V. Krasilnikov, A.Yu. Kuyanov, V.E. Lukash, A.B. Mineev, R.R. Khayrutdinov, *Plasma Phys. Rep.*, **47**, 1107 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21120047].
- [11] Г.С. Курский, Е.Е. Мухин, А.Н. Коваль, Н.С. Жильцов, В.А. Соловей, С.Ю. Толстяков, Е.Е. Ткаченко, А.Г. Раздобарин, А.М. Дмитриев, А.Ф. Корнев, А.М. Макаров, А.В. Горшков, Г.М. Асадулин, А.Б. Кукушкин, П.А. Сдвиженский, П.В. Чернаков, *Физика плазмы*, **48** (8), 711 (2022). DOI: 10.31857/S0367292122100134 [G.S. Kurskii, E.E. Mukhin, A.N. Koval, N.S. Zhil'tsov, V.A. Solovei, S.Yu. Tolstyakov, E.E. Tkachenko, A.G. Rasdobarin, A.M. Dmitriev, A.F. Kornev, A.M. Makarov, A.V. Gorshkov, G.M. Asadulin, A.B. Kukushkin, P.A. Sdvizhenskii, P.V. Chernakov, *Plasma Phys. Rep.*, **48**, 855 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22600487].
- [12] Г.С. Курский, Н.С. Жильцов, А.Н. Коваль, А.Ф. Корнев, А.М. Макаров, Е.Е. Мухин, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, В.А. Соловей, Е.Е. Ткаченко, С.Ю. Толстяков, П.В. Чернаков, *Письма в ЖТФ*, **47** (24), 41 (2021). DOI: 10.21883/PJTf.2021.24.51799.19019 [G.S. Kurskii, N.S. Zhiltsov, A.N. Koval, A.F. Kornev, A.M. Makarov, E.E. Mukhin, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.A. Solovey, E.E. Tkachenko, S.Yu. Tolstyakov, P.V. Chernakov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (15), 78 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.15.54273.19019].
- [13] G.S. Kurskii, A.P. Chernakov, V.A. Solovey, S.Yu. Tolstyakov, E.E. Mukhin, A.N. Koval, A.N. Bazhenov, S.E. Aleksandrov, N.S. Zhiltsov, V.A. Senichenkov, A.V. Lukoyanova, P.V. Chernakov, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, E.O. Kiselev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.B. Minaev, A.N. Novokhatsky, M.I. Patrov, A.V. Gorshkov, G.M. Asadulin, I.S. Bel'bas, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A*, **963**, 163734 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2020.163734
- [14] Г.С. Курский, Н.В. Сахаров, П.Б. Щёголев, Н.Н. Бахарев, Е.О. Киселев, Г.Ф. Авдеева, В.К. Гусев, А.Д. Ибляминова, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, М.И. Патров, Ю.В. Петров, А.Ю. Тельнова, С.Ю. Толстяков, В.А. Токарев, *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, **39** (4), 86 (2016). DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-4-86-94
- [15] M. Kadziela, B. Jablonski, P. Perek, D. Makowski, J. Fusion Energy, **39**, 261 (2020). DOI: 10.1007/s10894-020-00264-3
- [16] F.M. Laggner, A. Diallo, B.P. LeBlanc, R. Rozenblat, G. Tchilinguirian, E. Kolemen, NSTX-U Team, *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 043501 (2019). DOI: 10.1063/1.5088248
- [17] R. Rozenblat, E. Kolemen, F.M. Laggner, C. Freeman, G. Tchilinguirian, P. Sicht, G. Zimmer, *Fusion Sci. Technol.*, **75**, 835 (2019). DOI: 10.1080/15361055.2019.1658037
- [18] J.-H. Lee, S.J. Lee, H.J. Kim, S.H. Hahn, I. Yamada, H. Funaba, *Fusion Eng. Des.*, **190**, 113532 (2023). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2023.113532
- [19] K.C. Hammond, F.M. Laggner, A. Diallo, S. Doskoczynski, C. Freeman, H. Funaba, D.A. Gates, R. Rozenblat, G. Tchilinguirian, Z. Xing, I. Yamada, R. Yasuhara, G. Zimmer, E. Kolemen, *Rev. Sci. Instrum.*, **92**, 063523 (2021). DOI: 10.1063/5.0041507
- [20] I. Yamada, H. Funaba, J.-H. Lee, Y. Huang, C. Liu, *Plasma Fusion Res.*, **17**, 2402061 (2022). DOI: 10.1585/pfr.17.2402061
- [21] S. Shibaev, G. Naylor, R. Scannell, G.J. McArdle, M.J. Walsh, in *2010 17th IEEE-NPSS Real Time Conf.* (Lisbon, Portugal, 2010), p. 1–6. DOI: 10.1109/RTC.2010.5750394
- [22] S. Shibaev, G. Naylor, R. Scannell, G. McArdle, T. O'Gorman, M.J. Walsh, *Fusion Eng. Des.*, **85**, 683 (2010). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2010.03.035
- [23] H. Arnichand, Y. Andrebe, P. Blanchard, S. Antonioni, S. Couturier, J. Decker, B.P. Duval, F. Felici, C. Galperti, P.-F. Isoz, P. Lavanchy, X. Llobet, B. Marlétaz, P. Marmillod, J. Masur, *JINST*, **14**, C09013 (2019). DOI: 10.1088/1748-0221/14/09/C09013
- [24] T.N. Carlstrom, G.L. Campbell, J.C. DeBoo, R. Evanko, J. Evans, C.M. Greenfield, J. Haskovec, C.L. Hsieh, E. McKee, R.T. Snider, R. Stockdale, P.K. Trost, M.P. Thomas, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**, 4901 (1992). DOI: 10.1063/1.1143545
- [25] D.M. Ponce-Marquez, B.D. Bray, T.M. Deterly, C. Liu, D. Eldon, *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 10D525 (2010). DOI: 10.1063/1.3495759
- [26] M. Margo, B. Penaflo, H. Shen, J. Ferron, D. Piglowski, P. Nguyen, J. Rauch, M. Clement, A. Battey, C. Rea, *Fusion Eng. Des.*, **150**, 111368 (2020). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.111368
- [27] R.E. Stockdale, T.N. Carlstrom, C.L. Hsieh, C.C. Makariou, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 490 (1995). DOI: 10.1063/1.1146326