

УДК 533.9.08; 681.787

## ДИСПЕРСИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

С.В. Иваненко<sup>1</sup>, А.Л. Соломахин<sup>1,3</sup>, Н.С. Жильцов<sup>2</sup>, П.В. Зубарев<sup>1</sup>, Ю.В. Коваленко<sup>1</sup>, Г.С. Курскиев<sup>2</sup>,  
В.В. Солоха<sup>1,2</sup>, Е.Е. Ткаченко<sup>2</sup>, К.Д. Шулятьев<sup>1,2</sup>, Е.А. Пурыга<sup>1</sup>, А.Д. Хильченко<sup>1</sup>, В.Б. Минаев<sup>2</sup>,  
П.А. Багрянский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Статья посвящена описанию диагностики плотности плазмы токамака Глобус-М2 (г. Санкт-Петербург, Россия) на основе дисперсионного интерферометра (ДИ), использующего в качестве источника зондирующего излучения СО<sub>2</sub>-лазер. В работе приведены описание оптической схемы ДИ и результаты его первых испытаний, выявившие необходимость модернизации оптического и измерительного трактов. Описаны новые элементы ДИ и результаты, полученные в рамках его штатной работы на токамаке Глобус-М2. В настоящее время ДИ является полноценной частью диагностического комплекса токамака Глобус-М2 и позволяет в реальном времени получать надёжные данные об абсолютной величине электронной плотности плазмы во всех режимах работы установки. Размах шумового компонента при измерениях линейной плотности не превышает  $\langle nl \rangle_{\min} \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$  при временном разрешении в 20 мкс. Относительная погрешность вычисления абсолютного значения линейной плотности не превышает 2,5%.

**Ключевые слова:** интерферометрия, дисперсионный интерферометр, Глобус-М2, управление плотностью плазмы, цифровая обработка сигналов, фазометр, FPGA.

## DISPERSION INTERFEROMETER FOR TOKAMAK GLOBUS-M2

S.V. Ivanenko<sup>1</sup>, A.L. Solomakhin<sup>1,3</sup>, N.S. Zhiltsov<sup>2</sup>, P.V. Zubarev<sup>1</sup>, Yu.V. Kovalenko<sup>1</sup>, G.S. Kurskiev<sup>2</sup>, V.V. Solokha<sup>1,2</sup>,  
E.E. Tkachenko<sup>2</sup>, K.D. Shulyatiev<sup>1,2</sup>, E.A. Puryga<sup>1</sup>, A.D. Khilchenko<sup>1</sup>, V.B. Minaev<sup>1,2</sup>, P.A. Bagryansky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Physics G.I. Budker SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Ioffe Physical-Technical Institute RAS, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

The article is devoted to the description of plasma density diagnostics in the Globus-M2 tokamak (St. Petersburg, Russia) based on a dispersion interferometer (DI) using a CO<sub>2</sub> laser as a source of probing radiation. The paper presents a description of the DI optical scheme and the results of its first tests, which revealed the need to modernize the optical and measuring paths. The new elements of the DI and the results obtained as part of his regular work on the Globe-M2 tokamak are described. DI is a full-fledged part of the Globus-M2 diagnostic complex and makes it possible to obtain real-time reliable data of the plasma electron density absolute value in all operating modes of the tokamak. The range of the noise component during linear density measurements does not exceed  $\langle nl \rangle_{\min} \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-2}$  with a time resolution of 20  $\mu\text{s}$ . The relative error in calculating of the linear density absolute value does not exceed 2.5%.

**Key words:** interferometry, dispersive interferometer, Globus-M2, plasma density control, digital signal processing, phasemeter, FPGA.

DOI: 10.21517/0202-3822-2023-46-1-86-94

## ВВЕДЕНИЕ

Сферический токамак Глобус-М2 (г. Санкт-Петербург, Россия) [1—4] представляет собой уникальную научную установку для изучения методов нагрева и удержания плазмы в конфигурациях с малым аспектным отношением. Перспективным объектом применения технологий, разрабатываемых на Глобус-М2, является компактный термоядерный источник нейтронов на основе токамака [5]. Одна из разрабатываемых технологий — контроль плотности плазмы в течение продолжительного разряда (0,5 с и более). Для термоядерного источника нейтронов контроль плотности решает задачи подавления развития альфвеновских мод, уменьшения тепловых нагрузок на диверторные пластины и поддержания высокой доли быстрых частиц [5]. Электромагнитная система Глобус-М2 по своим инженерным характеристикам позволяет поддерживать разряд длительностью до 0,7 с [1]. Для реализации разряда с такой длительностью необходимо решить ряд задач, связанных с управлением параметрами плазменного разряда. Одним из ключевых параметров является плотность плазмы. На пути достижения разряда с полной длительностью приходится столкнуться с двумя проблемами, касающимися плотности плазмы. Первая связана с запланированным увеличением её плотности в недавно модернизированной установке выше  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ . В плазменных разрядах токамака Глобус-М2 при такой концентрации электронов используемый

СВЧ-интерферометр не работает из-за высокого влияния рефракции. Негативное влияние рефракции удалось бы несколько снизить, применив в качестве источника зондирующего излучения более коротковолновые лампы обратной волны (например, с  $\lambda = 0,8$  мм), но в настоящее время, к сожалению, они сняты с производства. Вторая проблема связана с неопределённостью мощности источника рабочего газа. Кроме газового клапана, позволяющего регулировать напуск с помощью внешнего воздействия, есть ещё стенка, от качества её подготовки и нагрузки на неё также зависит поступление газа в разряд (рециклинг). Вторым источником очень сложно управлять. Можно лишь только снизить его воздействие на разряд с помощью определённых технологических процедур: прогрева, чистки в разряде, боронизации, литиизации. Кроме этого, плотность плазмы сильно влияет на эффективность методов дополнительного нагрева и безындукционного поддержания тока в плазме [6—8].

Для фиксации характера поведения плотности плазмы во время разряда и реализации в будущем возможности управления этим параметром на токамаке Глобус-М2 было предложено использовать дисперсионный интерферометр (ДИ) на основе CO<sub>2</sub>-лазера с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения. Подобные интерферометры работают на установках ГДЛ (г. Новосибирск, Россия) [9], W-7X (г. Грейфсвальд, Германия) [10], LHD (г. Токио, Япония) [11], а также ранее применялся на установке TEXTOR (г. Юлих, Германия) [12]. Основными преимуществами интерферометра такого типа по сравнению с традиционными схемами Майкельсона или Маха—Цандера являются его компактность и слабая чувствительность к вибрациям оптических элементов. Вследствие зондирования длинами волн  $\approx 5$  и  $\approx 10$  мкм ДИ существенно менее чувствителен к влиянию рефракции, а большинства сбоев из-за вибраций или резкого изменения плотности плазмы удаётся избежать благодаря особенностям оптической схемы ДИ. При этом сохраняется приемлемый для УТС в современных установках набег фазы в отличие от интерферометров, работающих в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Также работа в среднем ИК-диапазоне увеличивает время жизни оптических элементов, установленных внутри вакуумной камеры, по сравнению с видимым и ближним ИК-диапазоном. При разработке ДИ для Глобус-М2 использовались схемы интерферометров, ранее созданные командой авторов для установок ГДЛ и TEXTOR. Для регистрации сигналов ДИ и вычисления плотности плазмы был разработан описанный в [13] измерительный модуль.

Основной акцент настоящей работы сделан на описании оптической схемы ДИ, результатах первых испытаний ДИ на токамаке Глобус-М2 и необходимости модернизации по результатам этих испытаний как оптической части ДИ, так и его измерительного модуля. Подробно описаны все изменения и результаты испытаний модернизированной системы на установке Глобус-М2.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ДИ И ЕГО ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В классической схеме дисперсионного интерферометра [9, 13, 14] сигнал фотоприёмника пропорционален интенсивности детектируемого излучения, которая является результатом интерференции лучей второй гармоники, генерируемых в нелинейных кристаллах до и после прохождения плазмы зондирующим излучением фундаментальной гармоники:  $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \sin(\Delta\varphi)$ , где  $I_1, I_2$  — интенсивности интерферирующих лучей второй гармоники,  $\Delta\varphi$  — разность их фаз, пропорциональная интегральной плотности плазмы  $\int n_e dl$  и связанная с ней выражением  $\Delta\varphi = \frac{3e^2}{2mc} \lambda \int_0^L n_e dl$ . В данном соотношении роль масштабных коэффициентов выполняют заряд электрона  $e$ , масса электрона  $m$ , скорость света  $c$  и длина волны зондирующего излучения  $\lambda$ . Поскольку зависимость сигнала фотодетектора от линейной плотности плазмы не является монотонной, для реализации алгоритма корректного её восстановления, подробно описанного в [13], в схему ДИ была добавлена электрооптическая ячейка. Она под воздействием приложенного напряжения синусоидальной формы искусственно изменяет набег фазы проходящего через неё излучения. В результате в аргументе функции, описывающей выходной сигнал ДИ, появляется осциллирующая компонента  $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \sin(M \sin(\Omega t) + \Delta\varphi)$  [13, 14]. При её амплитуде  $M$  в  $\pi$  и более радиан выходной сигнал изменяется от максимума до минимума независимо от набег фазы  $\Delta\varphi$ , обусловленного плазмой.

На рис. 1 показана оптическая схема дисперсионного интерферометра на Глобус-М2. Основная часть схемы размещена на оптической плите 1, расположенной в нескольких метрах от вакуумной камеры токамака 2. На вакуумной камере установлены оптические окна 3 и уголкового отражателя 4. Источником излучения служит перестраиваемый по длине волны CO<sub>2</sub>-лазер 5 (Access Laser AL50SG), настро-

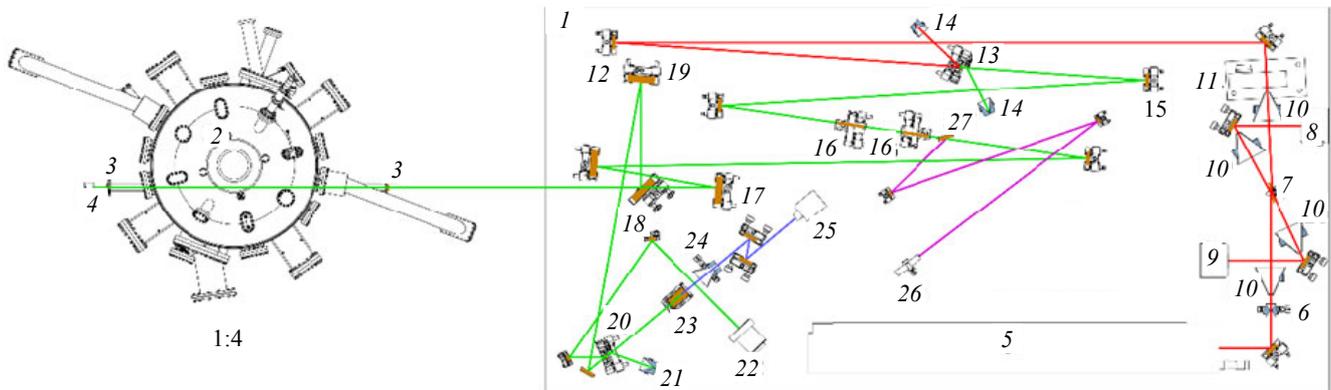


Рис. 1. Первоначальная оптическая схема дисперсионного интерферометра (Глобус-М2 уменьшен в 4 раза): 1 — оптическая плита; 2 — Глобус-М2; 3 — вакуумное окно; 4 — уголкового отражателя; 5 — лазер; 6, 10, 24 — диафрагма; 7 — делительная пластинка; 8 и 9 — детекторы 9,6 мкм; 11 — заслонка; 12, 15, 17, 19 — сферическое зеркало; 13, 20 — удвоитель частоты; 14, 21 — поглотитель; 16 — электрооптическая ячейка; 18 — разделитель пучков; 22 — датчик положения пучка; 23 — фильтр; 25 — детектор 4,8 мкм; 26 — видимый лазер; 27 — плоское зеркало; — 635 нм

енный на длину волны 9,6 мкм. После лазера установлена диафрагма 6, уменьшающая влияние излучения, отражённого элементами оптической системы, на лазер. Далее лазерный луч проходит через клиновидную пластинку из германия 7, установленную под углом Брюстера. Малая доля излучения отражается на детектор 8 (DEXTER ST150), который позволяет контролировать мощность лазера. Излучение, идущее от оптической системы в лазер, отражается от другой поверхности этой пластинки и регистрируется вторым детектором 9 (DEXTER ST150). Луч, являющийся результатом многократного отражения от поверхностей пластинки, поглощается конусовидными диафрагмами 10. Далее основная часть излучения проходит через механическую заслонку 11. Для обеспечения стабильности лазер работает в режиме непрерывной генерации, поэтому в целях безопасности эта заслонка в закрытом состоянии отражает излучение на охлаждаемый водой поглотитель, а открывается и пропускает лазерный луч в оптическую схему только во время измерения линейной плотности плазмы. Далее с помощью сферического зеркала 12 луч фокусируется в удвоитель частоты 13, в качестве которого используется нелинейный кристалл ZnGeP<sub>2</sub>. Луч, отражённый от граней кристалла, поглощается специальными поглотителями 14. В удвоителе частоты часть излучения преобразуется во вторую гармонику. Причём генерация организована так, что излучение первой и второй гармоник после удвоителя распространяется по одному пути. Далее луч с помощью ещё одного сферического зеркала 15 фокусируется в электрооптические ячейки 16, которые служат для модуляции фазы. Каждая ячейка представляет собой кристалл GaAs, в котором с помощью нанесённых на две противоположные грани электродов создаётся поперечное волновому вектору электрическое поле, меняющееся по синусоидальному закону с частотой 250 кГц. Излучение на первой и второй гармониках поляризовано в перпендикулярных плоскостях, а кристалл в электрооптической ячейке вырезан относительно кристаллографических осей так, что изначально изотропный кристалл при наложении электрического поля становится анизотропным. Его показатель преломления для излучения на второй гармонике получает небольшую добавку, пропорциональную приложенному напряжению (показатель преломления для первой гармоники остаётся неизменным). В выходном сигнале ДИ это приводит к появлению дополнительного набега фазы, изменяющегося с частотой 250 кГц. Для достижения требуемой глубины модуляции фазы (в  $\pi$  радиан) используются две идентичные ячейки, эффект от которых складывается. После этого излучение с помощью нескольких плоских и одного сферического зеркала 17 направляется через вакуумное окно 3 в плазму токамака и далее через ещё одно окно 3 на уголкового отражателя 4. В качестве окон используются просветлённые на две длины

волны (первая и вторая гармоника) плоскопараллельные пластины из ZnSe. Для защиты обращённой к плазме поверхности окон от тлеющего разряда на этапе подготовки к рабочему разряду, а также для их оперативной замены между каждым окном и вакуумной камерой установлены вакуумные затворы. Уголкового отражателя установлен относительно падающего излучения с небольшим смещением, поэтому отражённое излучение идёт параллельно падающему в обратную сторону со смещением на 2 см. Далее это обратное излучение снова проходит через вакуумные окна и плазму и на входе в оптическую схему с помощью специального зеркала 18 отводится в сторону от прямого. Далее с помощью сферического зеркала 19 излучение фокусируется во второй удвоитель частоты 20. Этот удвоитель частоты идентичен первому. Здесь также излучение первой гармоники частично преобразуется во вторую гармонику. При этом вторая гармоника, полученная в первом кристалле, не преобразуется в четвёртую или обратно в первую из-за того, что её мощность в  $\sim 10^5$  раз меньше мощности первой гармоники. После удвоителя уже три луча идут далее по одному пути. Как и в первом удвоителе, излучение, отражённое от одной из граней, поглощается специальным поглотителем 21. Излучение, отражённое от другой грани с помощью двух зеркал, попадает на датчик положения 22, который представляет собой пять детекторов DEXTER ST150, расположенных на плоскости, перпендикулярной лучу в форме креста. Он используется при юстировке оптической системы и для контроля качества юстировки во время работы интерферометра. Излучение, прошедшее через удвоитель частоты, попадает на фильтр 23 в виде клиновидной пластины из LiF, установленной под углом Брюстера для второй гармоники, которая полностью поглощает излучение первой гармоники и прозрачна для второй гармоники. Излучение, отражённое чётное число раз от граней фильтра и идущее в том же направлении, что и основное излучение, поглощается специальной конусовидной диафрагмой 24. Далее излучение второй гармоники с помощью двух зеркал фокусируется в основной детектор 25 (VIGO System PVI-4TE) и регистрируется им. Выходной сигнал детектора 25 передаётся измерительному модулю для восстановления значений интегральной плотности плазмы. Более детально этот модуль и алгоритмы его работы были описаны в [13].

Для первоначальной настройки прохождения излучения интерферометра через вакуумную камеру Глобус-М2 используется видимое излучение полупроводникового лазера 26. С помощью двух сферических зеркал формируется нужный для прохождения большого расстояния без заметной расходимости размер пучка и волновой фронт и далее с помощью плоского зеркала 27, которое на время настройки вставляется на пути ИК-луча, совмещается с ИК-излучением. После настройки это зеркало убирается и проводится окончательная настройка ИК-пучков.

## ПЕРВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДИ НА ГЛОБУС-М2

В рамках экспериментальной кампании 2021 г. дисперсионный интерферометр в комплекте с измерительным модулем был протестирован на токамаке Глобус-М2. Измерения производились в разрядах с током плазмы  $I_p = 0,2\text{—}0,4$  МА, тороидальным магнитным полем  $B_T = 0,6\text{—}0,9$  Тл в диверторной и лимитерных магнитных конфигурациях.

Первые испытания выявили ряд существенных недостатков описанной версии ДИ, которые не позволили производить корректные измерения электронной плотности и тем более использовать в дальнейшем результаты этих измерений в контурах управления плотностью плазмы. Рис. 2 демонстрирует пример некорректной работы алгоритма вычисления линейной плотности плазмы в одном из рабочих импульсов Глобус-М2. В интервале времени от  $\approx 200$  до  $\approx 230$  мс значение линейной плотности оказывается «отрицательным», что лишено физического смысла.

Наблюдаемые сбои в работе алгоритма восстановления плотности плазмы были связаны с сильным искажением формы сигнала ДИ и появлением в нём дополнительного нелинейного ком-

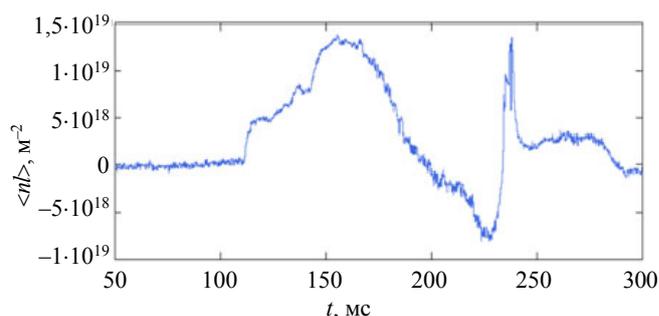


Рис. 2. Пример некорректной работы алгоритма вычисления фазы в одном из рабочих разрядов токамака Глобус-М2

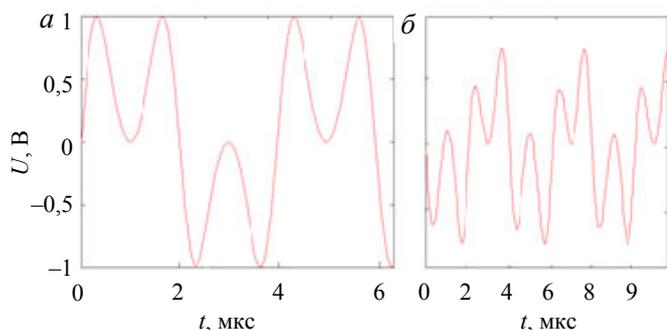


Рис. 3. Вид идеального (а) и реального (б) сигналов детектора

ления плотности плазмы измерительным модулем. При этом сама нелинейность была неоднородна по сечению электрооптического кристалла. Замена электрооптических ячеек на новые, изготовленные из кристаллов той же партии, также не повлияла на ситуацию. Всё это мотивировало принятие решения о переходе на другой тип модулятора.

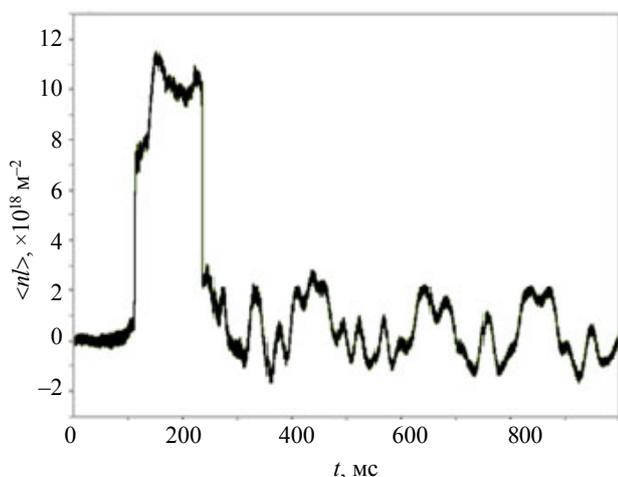


Рис. 4. Влияние вибраций уголкового отражателя на измерения линейной плотности плазмы

понента. Для наглядности на рис. 3 показан вид идеального и реального сигналов с детектора при набеге фазы  $\Delta\phi = 0$ .

Причиной такого поведения являлась некорректная работа электрооптических ячеек, которые должны давать приращение фазы, пропорциональное приложенному к ним напряжению. В реальности же приращение фазы в этих ячейках зависело от напряжения нелинейно, что приводило к искажениям сигнала детектора и, как следствие, к некорректному исполнению алгоритмов восстановления

Кроме этого, при проведении экспериментов было выявлено сильное влияние вибраций уголкового отражателя, закреплённого на вакуумной камере токамака Глобус-М2, на результаты измерений. Причинами этого могут быть неоднородность по сечению пучка нелинейности в модуляции фазы электрооптическими ячейками, наличие в тракте элементов с дисперсией, снос излучения в удвоителе частоты, а также влияние отражённого от уголкового отражателя на длину волны лазера из-за появления паразитной обратной связи. Этот эффект приводил к возникновению на сигнале низкочастотных колебаний, начиная с середины разряда и далее до его окончания (рис. 4).

Перечисленные недостатки потребовали модернизации как оптического, так и измерительного трактов ДИ.

### МОДЕРНИЗАЦИЯ ДИ И ЕГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

**Модернизация оптической системы ДИ.** В рамках модернизации ДИ электрооптические ячейки были заменены на эластооптический модулятор (Hinds Instruments PEM-200 II/ZS50), который представляет собой плоскопараллельную пластину из ZnSe. Эта пластина с помощью двух пьезоэлектрических элементов, установленных на противоположных гранях пластины, сжимается и растягивается в одном направлении. При такой деформации изначально изотропный кристалл ZnSe становится анизотропным для излучения и показатель преломления для первой и второй гармоник становится разным. Это даёт дополнительный набег фазы между интерферирующими на детекторе лучами второй гармоники. К пьезоэлектрическим элементам приложено синусоидальное напряжение с частотой 50 кГц. Это даёт возможность реализовать надёжный алгоритм восстановления фазы, который идентичен алгоритму, применённому при работе с электрооптической ячейкой.

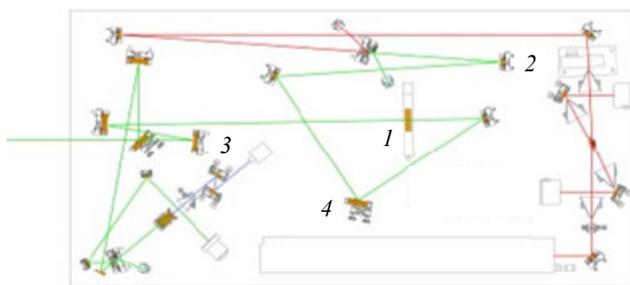


Рис. 5. Модернизированная оптическая система дисперсионного интерферометра: 1 — эластооптическая ячейка; 2, 3 — сферическое зеркало; 4 — плоское зеркало; — 9,6 мкм; — 9,6 + 4,8 мкм; — 4,8 + 4,8 мкм

Частота модулирующего сигнала в новом модуляторе в 5 раз меньше, чем в предыдущем, что вполне приемлемо для токамака Глобус-М2. Источником этого сигнала в модернизированной версии ДИ является контроллер эластооптического модулятора. В оптической системе (рис. 5) этот модулятор заместил электрооптические ячейки 1. Поскольку он имеет большие габариты, в оптической системе был изменён ход лучей между сферическими зеркалами 2, 3, а также установлено дополнительное плоское зеркало 4.

С целью исключения влияния вибраций вакуумной камеры на результаты измерений уголкового отражатель был размещён на отдельной стойке, механически изолированной от вакуумной камеры токамака.

**Модернизация измерительного модуля ДИ.** Необходимость модернизации измерительного модуля была, в основном, обусловлена переходом на новый тип модулятора. В рамках этой процедуры, помимо необходимости замены источника модулирующего сигнала и изменения частоты последнего, учитывались недостатки, выявленные в процессе испытаний предыдущей версии ДИ. К их числу относились:

- ввиду больших потерь на элементах оптического тракта амплитуда сигнала фотодетектора оказалась практически в 10 раз меньше, чем предполагалось. Всё это приводило к уменьшению разрешающей способности измерительного модуля и большей погрешности при вычислении плотности плазмы;

- недостаточный объём памяти для записи «сырых» сигналов фотодетектора в осциллографическом режиме не позволял записывать полный объём данных за один разряд. Это в итоге не позволяло полноценно контролировать и отлаживать работу алгоритмов восстановления плотности.

На рис. 6 показана схема нового измерительного модуля, построенного на основе двухканального регистратора экспериментальных данных с программно-модифицируемым функциональным потенциалом. В состав нового измерительного модуля включены:

- усилители с программно-управляемым коэффициентом усиления (PGA), согласующие диапазоны изменения сигнала фотодетектора и модулятора по амплитуде с амплитудной шкалой измерительных трактов;

- приёмник поступающего от контроллера эластооптического модулятора синхросигнала с частотой 50 кГц, а также генератор с фазовой автоподстройкой частоты (PLL), формирующий опорный синхросигнал (51,2 МГц), задающий частоту дискретизации АЦП;

- цифровой узел на основе программируемой вентильной матрицы (FPGA) семейства CycloneV с интегрированным процессорным ядром (ARM-9), работающим под управлением ОС Linux, ОЗУ (DDR3) объёмом 1 Гбайт и контроллером канала связи Ethernet-1000;

- контроллер памяти с буферным FIFO, обеспечивающий запись в режиме прямого доступа в ОЗУ процессора «сырых» данных, поступающих от АЦП в режиме реального времени на временном интервале длительностью до 10 с;

- контроллер для управления плотностью плазмы на основе ПИД-регулятора, взаимодействующий по последовательному каналу связи с выносным модулем управления пьезоэлектрическим клапаном напуска газа. Он ориентирован на формирование в токамаке Глобус-М2 заданного оператором характера изменения плотности плазмы во время разряда.

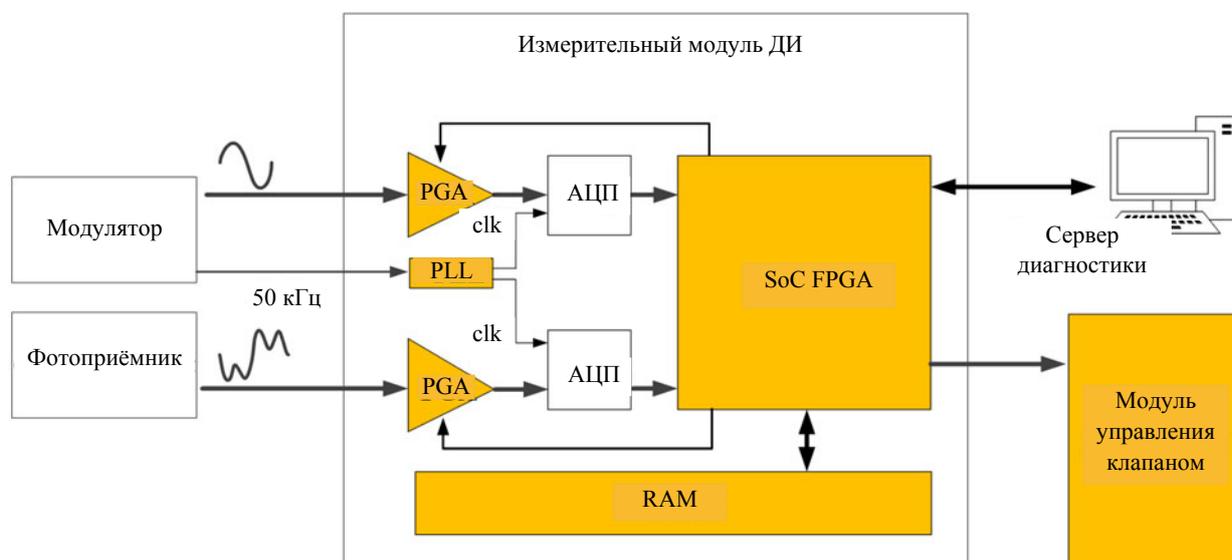


Рис. 6. Модернизированная схема измерительного модуля

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ДИ НА ГЛОБУС-М2

ДИ в конфигурации с эластооптическим модулятором перед измерениями на Глобус-М2 был откалиброван с помощью подвижного клина, установленного в области прямого и обратного лучей, пересекающих плазму. Клин был снабжён кривошипно-шатунным механизмом, позволяющим реализовать его возвратно-поступательные движения с периодом около 0,4 с и амплитудой перемещений  $7,2 \pm 0,2$  мм. Клин имел угол, равный одному градусу, и был изготовлен из  $\text{BaF}_2$ , показатель преломления для излучения с длиной волны 4,8 мкм имел величину  $n = 1,45$ , для излучения с длиной волны 9,6 мкм  $n = 1,40$ . Расчётный сдвиг фаз интерферирующих лучей второй гармоники при перемещении клина на 7,2 мм составил  $8,1 \pm 0,2$  рад. Калибровка показала совпадение результатов измерений и расчётов в пределах неопределённости ожидаемого сдвига по фазе. Ошибка измерения абсолютного значения фазового сдвига составила менее 2,5%.

На рис. 7 показаны результаты процедуры калибровки. На рис. 7, а показана зависимость измеренного при помощи ДИ фазового сдвига от времени при возвратно-поступательном движении клина. На рис. 7, б показан увеличенный фрагмент линейного участка кривой, показанной на рис. 7, а. Размах шумового компонента по представленным данным не превышает  $5 \cdot 10^{-3}$  рад, что соответствует значению линейной плотности плазмы  $\langle nl \rangle_{\min} \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ .

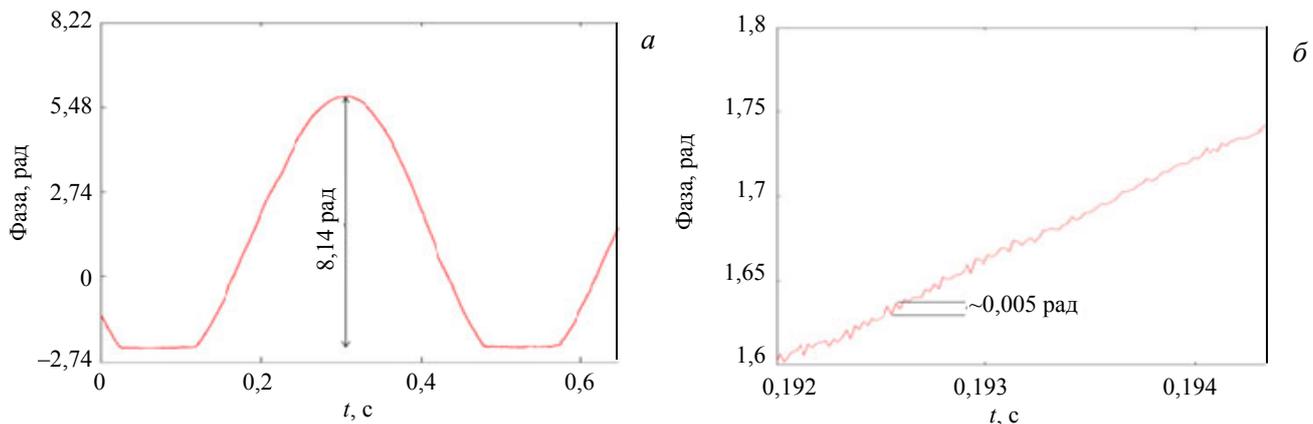


Рис. 7. Результаты калибровки ДИ при помощи оптического клина

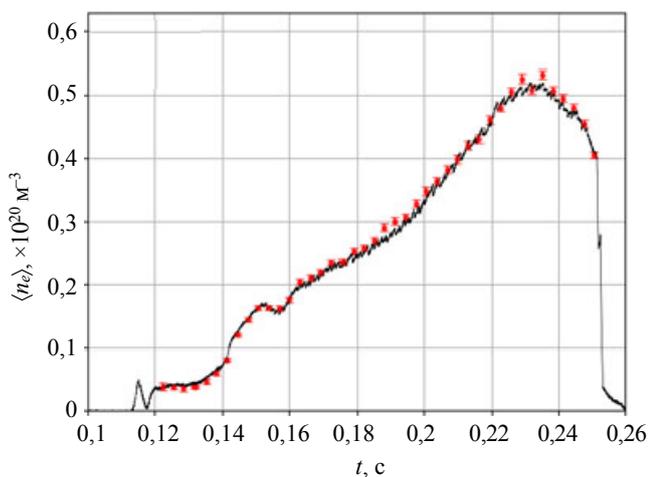


Рис. 8. Пример измерений средней по длине измерительной хорды электронной концентрации в разряде токамака Глобус-М2 № 42 575, проведённых ДИ с эластооптическим модулятором (—) и диагностикой томсоновского рассеяния (\*\*\*),  $B_T = 0,8$  Тл,  $I_p = 0,3$  МА

На рис. 8 в качестве примера показан результат измерений средней по длине измерительной хорды электронной плотности для разряда с типичными для большинства рабочих импульсов Глобус-М2 параметрами. Результаты измерений ДИ приведены в сравнении с данными, полученными при помощи диагностики томсоновского рассеяния, калибровка которого была проведена независимо.

Измерения производились в разрядах с током плазмы  $I_p = 0,2—0,4$  МА, тороидальным магнитным полем  $B_T = 0,6—0,9$  Тл в диверторной и лимитерных магнитных конфигурациях. Хорда измерения проходила через экваториальную плоскость токамака в прямом и обратном направлении. Длина хорды измерения зависит от магнитной конфигурации плазмы и

соответственно вычислялась с помощью данных кода, основанного на методе токовых колец [15]. Распределение длин хорд для разрядов экспериментальной кампании осени 2022 г. на Глобус-М2 показано на рис. 9. Средняя длина хорды измерений была равна 2,23 м. Среднее значение измеряемой линейно-интегрированной концентрации электронов составляло  $6,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$ . Максимальная линейно-интегрированная концентрация электронов  $2,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ .

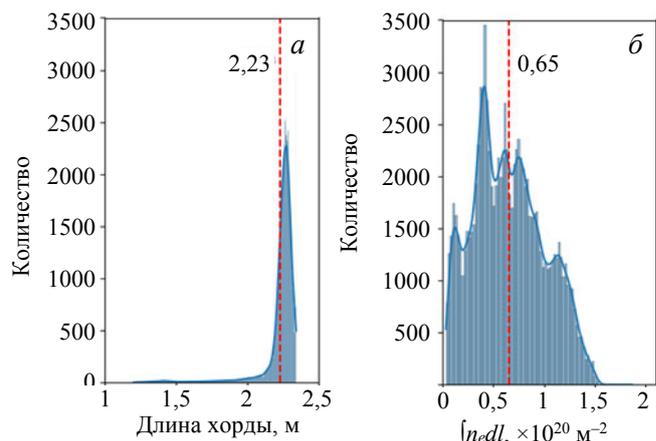


Рис. 9. Распределение длин хорд (а) и линейно-интегрированной концентрации электронов (б): --- — средние значения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные результаты проделанной работы по наладке и вводу в эксплуатацию описанного ДИ на установке Глобус-М2:

- интерферометр стал полноценной частью диагностического комплекса токамака Глобус-М2 и позволяет в реальном времени получать надёжные данные об абсолютной величине электронной плотности плазмы во всех режимах работы установки;

- размах шумового компонента при измерениях линейной плотности не превышает  $\langle nl \rangle_{\min} \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$  при временном разрешении 20 мкс. Относительная погрешность вычисления абсолютного значения линейной плотности не превышает 2,5%;

- в модернизированной версии измерительного модуля реализована возможность управления клапаном для инжекции газа в вакуумную камеру токамака в процессе рабочего импульса с целью планируемого в дальнейшем построения системы с обратной связью для управления плотностью плазмы, используя ДИ в качестве детектора.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-20201. Эксперименты проведены на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minaev V.B. et al. Spherical tokamak Globus-M2: design, integration, construction. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 56, № 6, 6 ArtNo: № 066047.
2. Kurskiy G.S. et al. The first observation of the hot ion mode at the Globus-M2 spherical tokamak. — Nucl. Fusion, 2022, vol. 62, 10 ArtNo: № 104002.
3. Kurskiy G.S. et al. Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field reaching 0.8 T. — Nucl. Fusion, 2022, vol. 62, 1 ArtNo: № 016011.
4. Petrov Yu.V. et al. Overview of Globus-M2 spherical tokamak results at the enhanced values of magnetic field and plasma current. — Nucl. Fusion, 2022, vol. 62, 4 ArtNo: 3 042009.
5. Kuteev B.V. et al. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 073035; doi: 10.1088/0029-5515/55/7/073035.
6. Щёголев П.Б. и др. Генерация безындукционных токов путём инжекции пучка атомов в сферическом токамаке Глобус-М. — Физика плазмы, 2019, т. 45, № 3, с. 213—225.
7. Gusev V.K. et al. Review of Globus-M spherical tokamak results. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, № 10.
8. Dyachenko V.V. et al. The first lower hybrid current drive experiments in the spherical tokamak Globus-M. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, № 11.
9. Соломахин А.Л., Багрянский П.А., Воскобойников Р.В., Зубарев П.В., Квашнин А.Н., Лизунов А.А., Максимов В.В., Хильченко А.Д. Дисперсионный интерферометр на основе CO<sub>2</sub>-лазера. — Приборы и техника эксперимента, 2005, № 5, с. 96—106.
10. Knauer J. et al. Power balance analysis of wendelstein. — In: 7-X Plasmas Using Profile Diagnostics 43rd EPS Conference on Plasma Physics, P4.017.
11. Akiyama T., Yasuhara R., Kawahata K., Nakayama K., Okajima S., Urabe K., Terashima K., Shirai N. Development of dispersion interferometer for magnetic confinement plasmas and high-pressure plasmas. — J. of Instrumentation, 2015, vol 10, P09022.

12. Dreier H., Bagryansky P., Baumgarten N., Biel W., Lambertz H.T., Lehnen M., Lizunov A., Solomakhin A. First results from the modular multi-channel dispersion interferometer at the TEXTOR tokamak. — Review of Scientific Instruments, 2011, vol 82, p. 063509.
13. Иваненко С.В., Гринемайер К.А., Пурьга Е.А., Квашнин А.Н., Багрянский П.А. Измерительный модуль дисперсионного интерферометра на основе CO<sub>2</sub>-лазера для управления плотностью плазмы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 1, с. 67—78.
14. Хильченко А.Д., Квашнин А.Н., Иваненко С.В., Зубарев П.В., Моисеев Д.В., Коваленко Ю.В. Измерительный комплекс дисперсионного интерферометра на основе CO<sub>2</sub> лазера. — Приборы и техника эксперимента, 2009, № 3, с. 78—90.
15. Sakharov N.V. et al. Reconstruction of equilibrium magnetic configurations in the Globus-M spherical tokamak. — Plasma Phys., 2015, Rep. 41, p. 997—1001.



Светлана Владимировна Иваненко, с.н.с., к. техн. н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 11, Россия  
S.V.ivaneko@inp.nsk.su



Александр Леонидович Соломахин, к.ф.-м.н., с.н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 11, Россия; ассистент; НГУ, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова 2, Россия



Никита Сергеевич Жильцов, м.н.с., аспирант; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Россия  
nikita.zh@mail.ioffe.ru



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



Юрий Васильевич Коваленко, с.н.с., к. техн. н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 11, Россия



Глеб Сергеевич Курский, н.с., к.ф.-м.н.; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Россия  
gleb.kurskiy@gmail.com



Владимир Владимирович Солоха, м.н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера, 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 11, Россия; ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Россия  
v.solokha@spbstu.ru



Екатерина Евгеньевна Ткаченко, старший лаборант-исследователь; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Россия



Константин Дмитриевич Шулятьев, м.н.с.; ИЯФ им. Г.И. Будкера, 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 11, Россия; аспирант; ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, Россия



Екатерина Александровна Пурьга, с.н.с., к. техн. н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 11, Россия



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



Владимир Борисович Минаев, в.н.с., к.ф.-м.н., заместитель руководителя установки, лауреат премии Правительства РФ; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Россия  
vladimir.minaev@mail.ioffe.ru



Петр Андреевич Багрянский, заместитель директора по научной работе, д.ф.-м.н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 11, Россия

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2022 г.  
После доработки 28 декабря 2022 г.  
Принята к публикации 11 января 2023 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 1, с. 86—94.