

УДК 621

**А. А. Листопад, В. И. Давыденко, А. А. Иванов, В. В. Мишагин
Р. Улеманн, Б. Швеев**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: alexlist@yandex.ru

МНОГОЩЕЛЕВАЯ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ*

Для формирования узкого диагностического атомарного пучка принципиально важным является вопрос обеспечения его малой угловой расходимости. При использовании щелевой геометрии угловая расходимость пучка в направлении вдоль щелей определяется, главным образом, ионной температурой в источнике. В результате применения многощелевой ионной оптики на инжекторе RUDI полный ток пучка в ионах увеличен с 2 до 3 А, угловая расходимость пучка в направлении вдоль щелей снижена до $0,35^\circ$.

Ключевые слова: диагностика плазмы, нейтральные пучки, щелевая ионная оптика, геометрическая фокусировка.

Введение

Диагностика плазмы играет важную роль в плазменных экспериментах. В 1998 г. для спектроскопии перезарядки ионов примесей плазмы (CXRS) на токамаке TEXTOR (научно-исследовательский центр «Юлих», Германия) был разработан диагностический инжектор RUDI [1]. Для ускорения и формирования 50 кэВ водородного пучка в инжекторе используется многоапертурная четырехэлектродная ионно-оптическая система (ИОС), особенностью которой является геометрическая фокусировка пучка. Для этого поверхности электродов ИОС имеют сферическую форму, а оси элементарных ячеек направлены в одну точку для сведения всех элементарных пучков в общий фокус. Радиус кривизны, определяющий фокусное расстояние, составляет 4 м, точка фокуса примерно соответствует положению центра плазменного шнура токамака.

Предыдущая версия ИОС RUDI, имевшая многоапертурную геометрию с круглыми ячейками, обеспечивала угловую расходимость на уровне $0,55^\circ$. При модернизации инжектора было решено использовать многощелевую ионную оптику с целью увеличения полного тока пучка и снижения угловой расходимости [2]. Щелевая ионная оптика ранее разрабатывалась для диагностического инжектора RUDI-X. Были проведены компьютерные расчеты и тестовые эксперименты формирования пучка при помощи элементарной щелевой ячейки [5]. На основании результатов данных исследований и проведенных тепловых расчетов различных версий геометрии расположения ячеек была создана ИОС RUDI с параллельными щелями. Применение щелевой оптики позволило получить значение угловой расходимости пучка вдоль щелей около $0,35-0,4$ и $0,6-0,65^\circ$ в направлении поперек щелей.

* Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

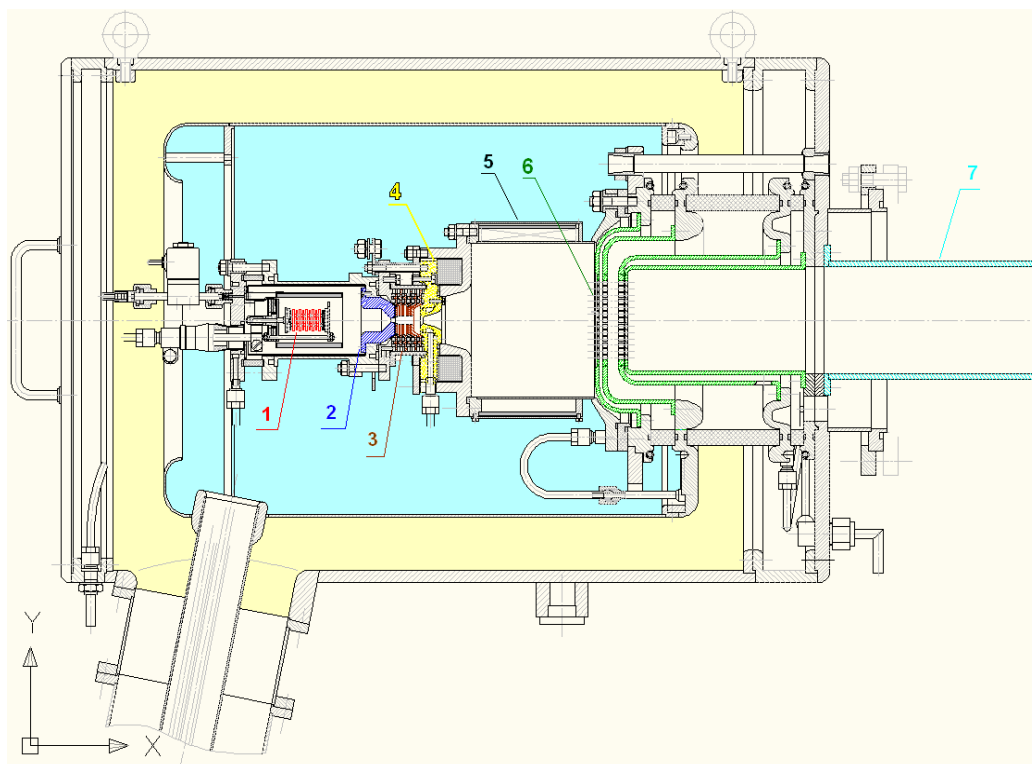


Рис. 1. Схема ионного источника RUDI: 1 – термокатод; 2 – вставка катода; 3 – дуговой канал; 4 – анод; 5 – расширительная камера с магнитной стенкой; 6 – ионно-оптическая система; 7 – нейтронизатор

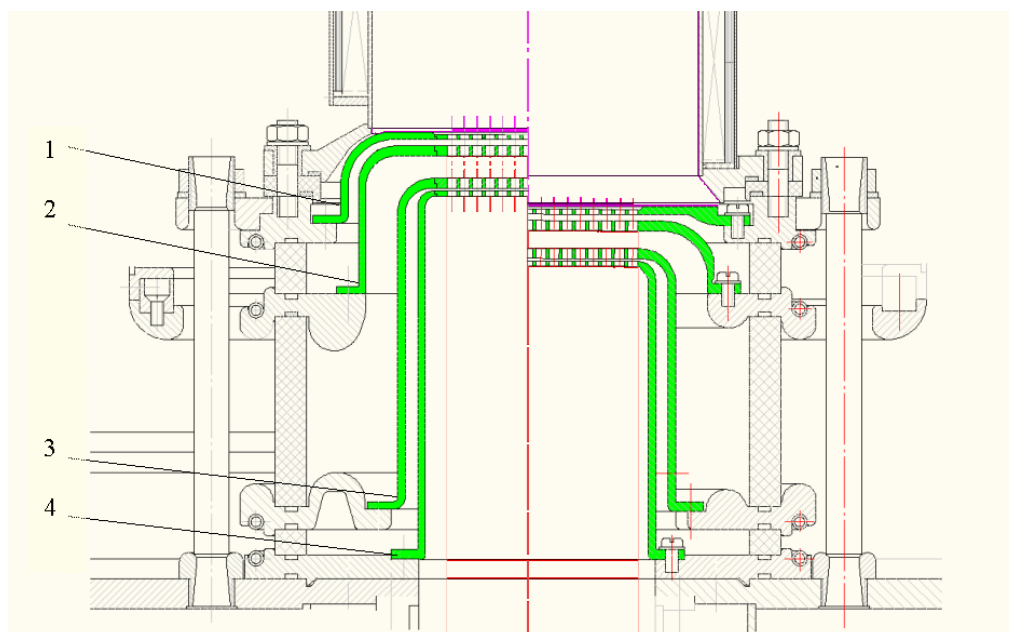


Рис. 2. Ионно-оптическая система в сборе (слева показана предыдущая геометрия, справа – геометрия с новыми щелевыми сетками и увеличенной апертурой): 1 – плазменный электрод; 2 – вытягивающий электрод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – заземленный электрод

Диагностический инжектор RUDI

Ниже приведены основные параметры диагностического водородного пучка RUDI (в скобках указаны параметры после модернизации 2010 г.):

- энергия частиц – 50 кэВ;
- ток ионного пучка – 2 (3) А;
- ток пучка 50 кэВ атомов – 1,1 (1,5) А;
- длительность импульса – 4 с (8 с);
- фокусное расстояние – 4 м;
- диаметр пучка $1/e$ (в фокусе) – 80 мм (50 × 90 мм);
- угловая расходимость – $\pm 0,55^\circ$ ($0,35 \times 0,6^\circ$).

В источнике RUDI для генерации плазмы применяется дуговой разряд с накаливаемым катодом [3]. Схема дугового источника приведена на рис. 1. Плазма образуется в компактном дуговом канале, после чего попадает в расширительный объем с периферийной магнитной стенкой. Наличие магнитной стенки повышает однородность плазменного потока на первый электрод ИОС.

Ионно-оптическая система

Для формирования диагностического пучка RUDI используется четырехэлектродная ионно-оптическая система (рис. 2).

Система электродов имеет следующее распределение потенциалов:

- плазменный электрод – 50 кВ;
- вытягивающий электрод – 43 кВ;
- ускоряющий электрод – –0,5 кВ;
- заземленный электрод – 0 В.

Отрицательное напряжение на третьем электроде предотвращает попадание электронного потока из вторичной плазмы в ускоряющий зазор.

В данной ионно-оптической системе реализован принцип геометрической фокусировки, т. е. полный пучок формируется из множества направленных в общую точку фокуса элементарных пучков. Сеточная система RUDI имеет активное водяное охлаждение. Поскольку размещение водяных каналов непосредственно в рабочей области сеток представляет определенные технологические трудности, в данной конструкции каналы системы охлаждения расположены на периферии держателей сеток.

Разработка щелевой ионно-оптической системы

Первая версия ионно-оптической системы RUDI, спроектированная с круглыми ячейками диаметром 4 мм, была оптимизирована для создания водородного пучка с энергией 50 кэВ и угловой расходимостью $0,55^\circ$. Данная величина была обусловлена aberrациями ионной оптики.

Одним из вариантов формирования пучка с более низкими значениями угловой расходимости является применение щелеобразной геометрии электродов (рис. 3) [5]. В этом случае компоненту электрического поля вдоль щели можно считать нулевой, и расходимость пучка в этом направлении обусловлена только поперечной температурой плазмы в источнике, которая обычно имеет значения порядка 2–3 эВ. Приняв данное значение для пучка энергией 50 кэВ, получим величину остаточной угловой расходимости, вычисляемую как $(T_i/E)^{1/2} \sim 0,3\text{--}0,4^\circ$.

Среди других достоинств щелевой геометрии следует отметить ее потенциально более высокую прозрачность и, следовательно, более высокие возможные значения

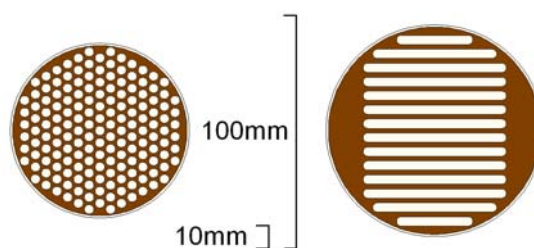


Рис. 3. Сравнение существующей и щелевой геометрии электродов

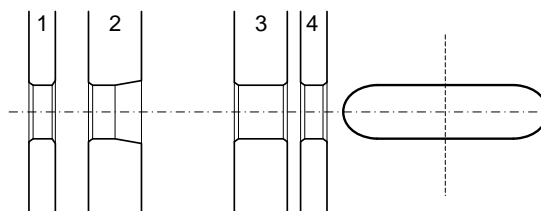


Рис. 4. Экспериментальная щелевая ИОС. Отверстие 4 × 20 мм, толщина электродов 2, 4, 4, 2 мм, зазоры 2,6 / 7 / 1 мм

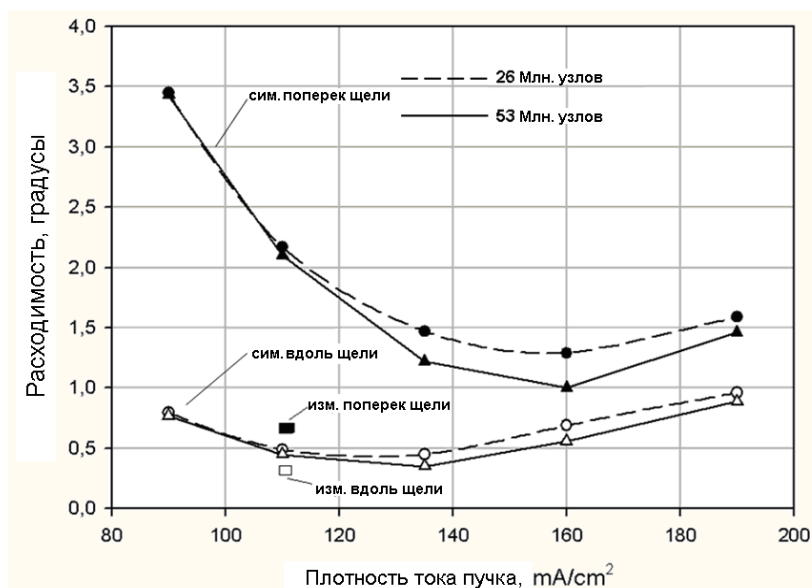


Рис. 5. Согласование трехмерных компьютерных симуляций кода КОBRA-3D с результатами экспериментальных измерений

тока пучка по сравнению с дырочной геометрией при исходном размере сеток. К проблемам реализации щелевой оптики можно отнести несколько более затрудненный теплоотвод от длинных перемычек между щелями.

При рассмотрении вариантов щелевой геометрии за основу была взята геометрия круглой элементарной ячейки инжектора RUDI с исходными значениями толщин электродов, фасок и зазоров (рис. 4). Края щели были выполнены с закруглением с радиусом кривизны, аналогичным круглой ячейке. Для подтверждения работоспособности щелевой геометрии было проведено трехмерное моделирование формирования пучка одиночной щелевой ячейкой 4×20 мм при помощи кода КОBRA-3D, с помощью которого вычислялись значения угловой расходимости как поперек, так и вдоль щели. Результаты данных расчетов представлены на рис. 5, где также продемонстрирована зависимость точности результатов моделирования от числа разбиений ячейки (сплошная линия – разбиение на 53 млн узлов, пунктир – разбиение на 26 млн узлов).

Помимо этого, в Институте ядерной физики были проведены тестовые эксперименты с однощелевой ИОС 4×20 мм, в ходе которых измеренные значения угловой расходимости пучка вдоль и поперек щели составили соответственно $0,35$ и $0,65^\circ$ (см. рис. 5).

Принципиально важным является вопрос тепловой деформации электродов ионно-оптической системы в результате попадания на их поверхность частиц пучка и плазмы из источника, поскольку для аккуратного формирования пучка с малой расходимостью к взаимному расположению электродов ИОС предъявляются достаточно жесткие требования.

Для получения количественной оценки величин тепловых деформаций на программе ANSYS проведены тепловые расчеты существующей геометрии ИОС и проанализированы возможные варианты щелевой геометрии. Всего было рассмотрено порядка 20 вариантов геометрии с различным количеством, длинами и расположением щелей, с разным значением прозрачности и апертуры ИОС.

Приняты следующие условия расчетов:

- падающая тепловая мощность на рабочую область сетки – 600 Вт (предполагая значение падающей мощности $\sim 0,8\%$ от полной мощности пучка [6], которая составляет 75 кВт);
- водяное охлаждение периферийной области сетки с конвективным теплообменом $16\,000$ Вт/м²·К;
- расчеты проведены для импульсов 8 с.

Вычисления показали, что оптимальной в отношении величин продольных и поперечных деформаций является геометрия с щелями длиной до 60 мм, и прозрачностью

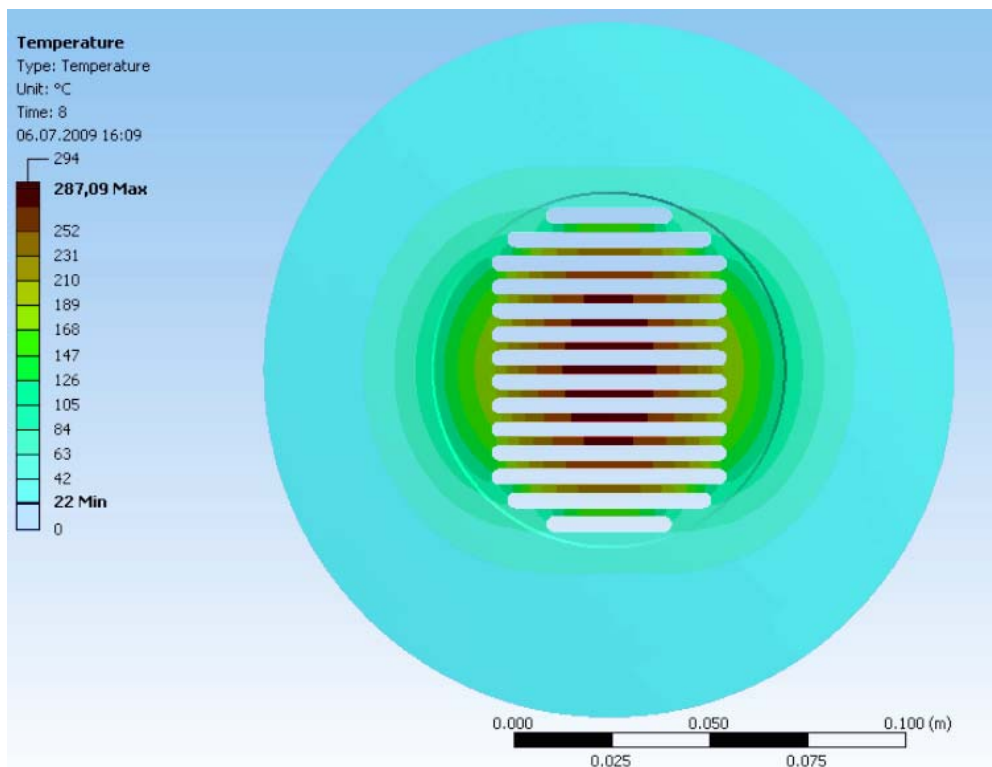


Рис. 6. Распределение температуры на сетке 1

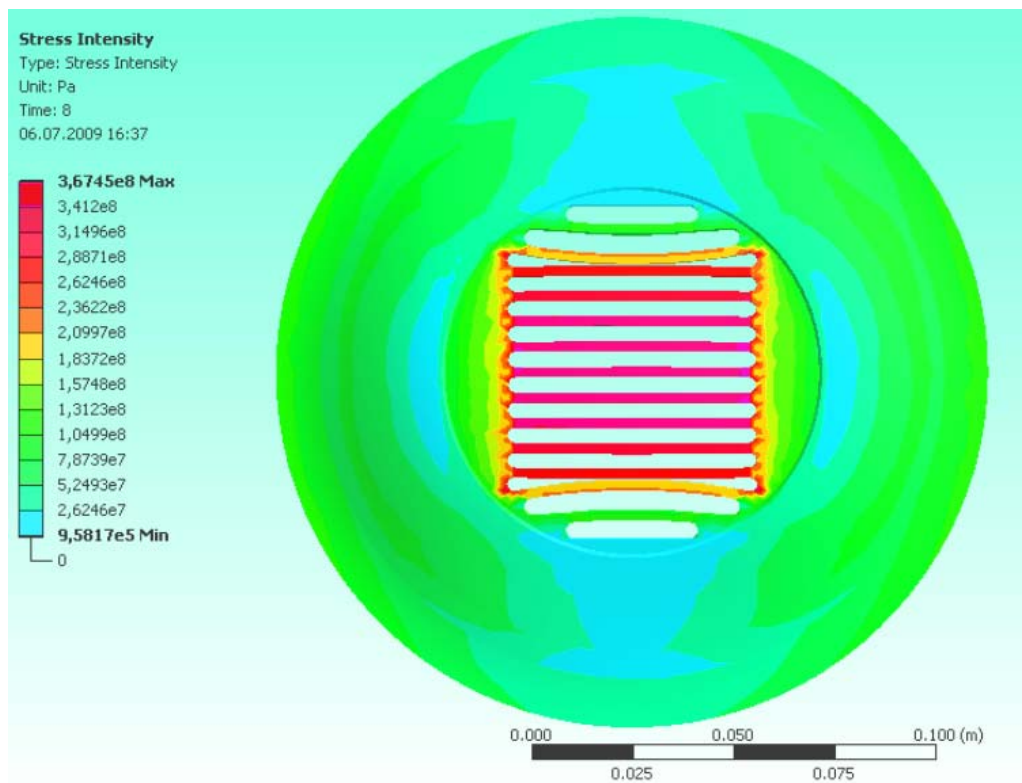


Рис. 7. Распределение внутренних напряжений сетки 1

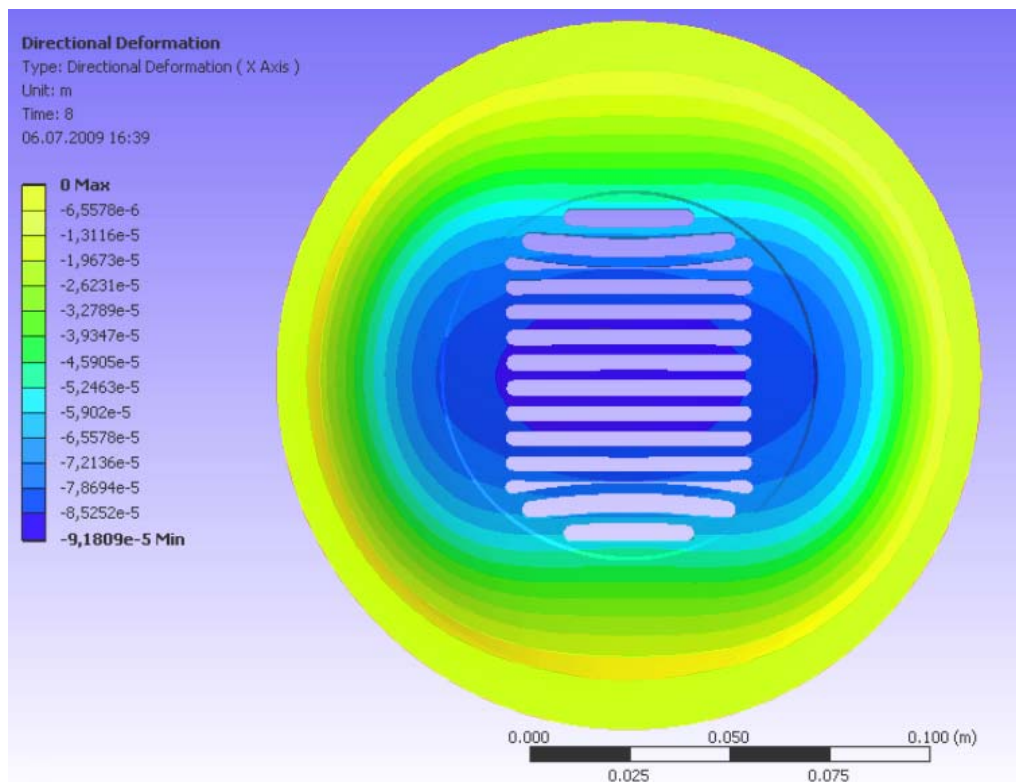


Рис. 8. Деформации сетки 1 вдоль оси пучка

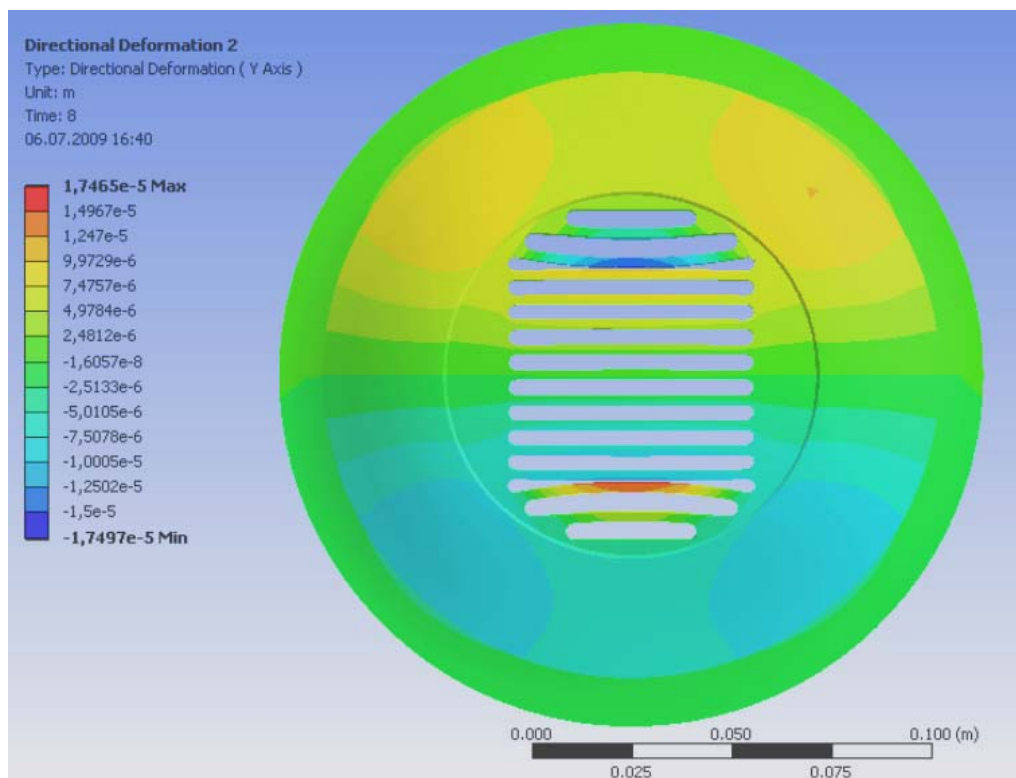


Рис. 9. Поперечные деформации сетки 1

~ 67 %. Дальнейшее увеличение прозрачности вызывает снижение механической прочности и жесткости сетки и приводит к росту тепловых деформаций. Для увеличения расчетного значения тока пучка с 2 до 3 А апертура ИОС по сравнению со старой была увеличена с 73 до 84 мм.

На рис. 6–9 представлены результаты расчетов распределения температуры, внутренних напряжений и деформаций для первого электрода многощелевой ИОС.

Молибденовый сплав TZM использован для производства первой и второй сеток, для которых малые значения тепловых деформаций являются главным требованием при формировании пучка, а третья и четвертая сетки изготовлены из меди, поскольку в силу их геометрии и конструктивных особенностей ИОС (удаленность каналов системы охлаждения от рабочей области) ключевым моментом для них является обеспечение эффективного теплоотвода. Геометрия и взаимное расположение электродов ИОС показаны на рис. 10.

Согласно результатам тепловых расчетов финальной версии щелевой ИОС, под действием пучка с током 3 А, энергией 50 кэВ и длительностью 8 с максимальная температура нагрева 287 °С достигается на первой сетке, наибольшие деформации вдоль и поперек оси пучка наблюдаются на четвертой сетке и составляют соответственно 0,131 и 30,7 мкм.

Производство электродов было осуществлено в Германии на фабрике PLM GmbH. На рис. 11 и 12 представлены изготовленные электроды многощелевой ИОС RUDI. Необходимо подчеркнуть, что впервые отработана технология изготовления сеток с прецизионной геометрией формирующих щелевых ячеек на сферической поверхности, для чего были применены технологии фрезеровки и шлифовки с компьютерным управлением, а также метод дуговой эрозии. Более того, сетки производились из цельных заготовок без паяных и прочих соединений. Контроль точности изготовления электродов, а позднее и точности сборки ИОС осуществлялся с помощью Цейссовской измерительной машины с точностью 0,001 мм. Согласно измерениям кривизны сферической поверхности сеток, реальное фокусное расстояние ИОС составило 3,5 м, это значение в дальнейшем использовалось при расчетах угловой расходимости пучка.

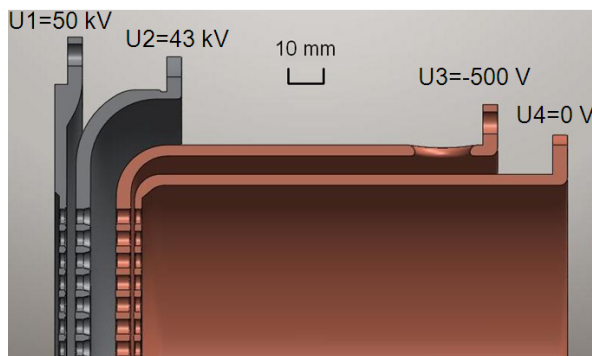


Рис. 10. Взаимное расположение электродов 1–4 ИОС (слева направо)



Рис. 11. Высоковольтные электроды щелевой ИОС



Рис. 12. Щелевая ИОС RUDI в сборе

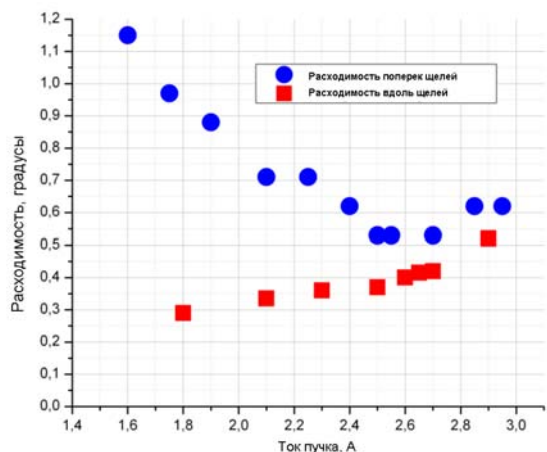


Рис. 13. Сопоставление расходимости пучка вдоль и поперек щелей

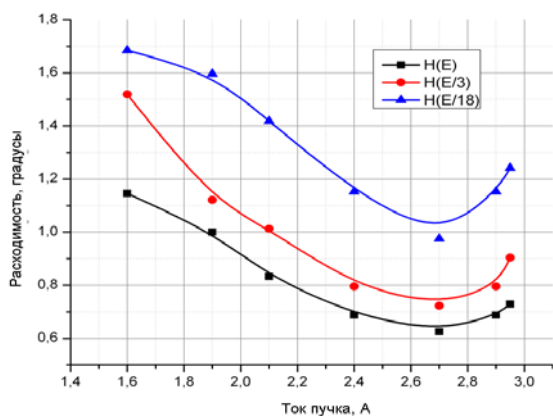


Рис. 14. Зависимость расходимости 45 кэВ пучка, измеренной в направлении поперек щелей структуры ИОС

Тестовые испытания формирования пучка с новой многощелевой ИОС

При установке на RUDI новой ионно-оптической системы была проведена серия исследований формирования пучка. В направлениях вдоль и поперек щелей на основании результатов оптических измерений профилей пучка вычислялись значения угловой расходимости его компонент. Помимо этого, в направлении поперек щелей H_α спектр пучка исследован с высоким ($\lambda/\delta\lambda = 60\,000$) спектральным разрешением, что на основе анализа уширенных спектральных линий позволило восстановить

расходимости компонент пучка из измеренных значений поперечных скоростей в пучке.

В соответствии со свойствами щелевой ионной оптики угловая расходимость пучка вдоль и поперек щелей имеет различные значения. Это наглядно продемонстрировано на сканах угловой расходимости для 45 кэВ пучка (рис. 13). В направлении вдоль щелей пучок, как ожидалось, имеет пониженный уровень расходимости по сравнению со случаем наблюдения поперек щелей или с предыдущей версией ИОС RUDI с круглыми отверстиями, поскольку в направлении вдоль щели в формирующей структуре практически отсутствуют аберрации, связанные с неоднородностью электрического поля. Результаты измерения профилей пучка калориметром, проводимые ранее, находятся в хорошем соответствии с оптическими измерениями.

Следует отметить, что при исследовании расходимости пучка вдоль щелей не обнаружено выраженного минимума на графике зависимости от тока (см. рис. 13), что может свидетельствовать о низком уровне аберраций в направлении вдоль щелей. Помимо этого, отмечается незначительное возрастание расходимости вдоль щелей при увеличении тока пучка. Это может быть объяснено ростом плазменной температуры в источнике, поскольку ток пучка регулируется параметрами мощности дугового разряда в генераторе.

Вычисленные значения угловой расходимости для компонент 45 кэВ пучка в направлении поперек щелей представлены на рис. 14. Минимум угловой расходимости пучка соответствует значению тока 2,7 А, что находится в хорошем соответствии с законом Чайлда – Лэнгмюра для данного напряжения. Значение угловой расходимости, полученное при этом, составило $0,65^\circ$ для компоненты с полной энергией. Данное значение полного тока соответствует плотности тока пучка, равной 90 мА/см^2 . Пересчет в соответствии с законом Чайлда – Лэнгмюра дает значение оптимальной плотности тока 105 мА/см^2 для напряжения 50 кВ.

В ходе экспериментальных измерений было отмечено существенное различие угловой расходимости для разных компонент

пучка. Это, по-видимому, связано с приобретением молекулярными компонентами дополнительного вклада в поперечную компоненту скорости за счет высвобождения энергии связи при столкновительной диссоциации молекулы. Данный эффект можно оценить количественно: если принять начальную поперечную температуру 2 эВ, суммарный выход энергии при диссоциации составляет 2–4 эВ, то конечная температура для атомов с половинной энергией составит около 2–3 эВ, для третьей компоненты – 1,5–2 эВ. При вычислении угловой расходимости данные значения дадут для компоненты с полной энергией 0,35 и 0,6° для $E/2$ и для $E/3$. В реальности указанные расходимости оказываются несколько выше вследствие аберраций ионной оптики.

Заключение

В результате проведенной модернизации диагностического инжектора RUDI была разработана новая ионно-оптическая система с щелевыми формирующими ячейками, рассчитанная на ток пучка в ионах до 3 А, и угловую расходимость 0,35° в направлении вдоль щелей, а также усиленный вариант дугового генератора, позволивший увеличить предельное время импульса пучка в модулированном режиме до 8,5 с. Для приложений CXRS диагностики рост плотности пучка в области фокуса позволил увеличить уровень сигнала и соответственно повысить временное разрешение измерений, а увеличенная длительность инжекции дала для диагностики возможность покрыть по времени целиком время разряда плазмы на TEXTORe.

После модернизации ионно-оптической системы и дугового генератора RUDI была проведена серия CXRS измерений профилей ионной температуры плазмы вдоль малого радиуса токамака TEXTOR и скорости полоидального вращения плазмы. При этом достигнутая точность измерений ионной температуры составила около 3 эВ в районе границы плазмы со стенкой, скорость вращения плазмы была измерена с точностью 0,5 км/с.

Экспериментальные результаты свидетельствуют, что диагностический пучок RUDI в новой конфигурации благодаря бо-

лее чем двукратному росту диагностического сигнала обеспечивает стабильные измерения скорости и ионной температуры плазмы на токамаке TEXTOR с временным разрешением порядка 1 с [7]. До модернизации инжектора измерение ионной температуры со схожей точностью требовало усреднения до 2 с, а восстановление скорости полоидального вращения – до 4 с.

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН в стадии разработки находятся несколько проектов инжекторов нейтральных пучков, которые могут быть реализованы на базе щелевой ионной оптики, в частности большой диагностический инжектор RUDI-X для стелларатора Wendelstein-7X, нагревные и диагностический пучки для токамака TCV и др.

Список литературы

1. Deichuli P. P., Ivanov A. A., Mishagin V. V., Sorokin A. V., Stupishin N. V., Shulzhenko G. I. Multi-Seconds Diagnostic Neutral Beam Injector Based on Arc-Discharge with LaB₆ Hollow Cathode // Fusion Science And Technology. 2005. Vol. 47 (1T). P. 330.
2. Listopad A. A., Coenen J. W., Davydenko V. I., Deichuli P. P., Ivanov A. A., Mishagin V. V., Savkin V. Ya., Schalt W., Schweer B., Shulzhenko G. I., Stupishin N. V., Uhlemann R. Operation and Upgrade of Diagnostic Neutral Beam Injector RUDI at TEXTOR Tokamak // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. P. 02B104.
3. Ivanov A. A., Davydenko V. I., Deichuli P. P., Shulzhenko G. I., Stupishin N. V. Ion Sources with Arc-Discharge Plasma Box Driven by Directly Heated LaB₆ Electron Emitter or Cold Cathode (Invited) // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. P. 02C103.
4. Семашко Н. Н. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. М.: Энергоиздат, 1981.
5. Davydenko V. I., Ivanov A. A., Shikhovtsev I. V., Sorokin A. V., Uhlemann R. Beam Formation by Ion Optical System with Slit Finite Length Apertures // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. P. 02B720.
6. Beklemishev A. D., Davydenko V. I., Ivanov A. A., Podyminogin A. A. Assessment of Thermo-Mechanical Stresses and Stability of Ion-Source Grids with Peripheral Cooling //

Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. P. 2007–2011.

7. Listopad A., Coenen J., Davydenko V., Ivanov A., Mishagin V., Savkin V., Schweer B., Shulzhenko G., Uhlemann R. Use of the Focus-

ing Multi-Slit Ion Optical System at Russian Diagnostic Injector (RUDI) // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83, is. 2. P. 02B707.

Материал поступил в редколлегию 02.04.2012

**A. A. Listopad, V. I. Davydenko, A. A. Ivanov, V. V. Mishagin,
R. Uhlemann, B. Schweer**

**MULTISLIT FOUR-ELECTRODE ION-OPTICAL SYSTEM
FOR FAST ATOMICAL DIAGNOSTIC BEAM FORMATION**

For the formation of a narrow atomic diagnostic beam the providing of small angular divergence is fundamentally important issue. When using a slit geometry angular divergence of the beam in the direction along the slit is mainly determined by ion temperature in the plasma source. As a result of the applying the multislit ion optics to the injector RUDI the total beam current (in ions) is increased from 2 to 3 A, the angular divergence of the beam in the direction along the slit is reduced to 0.35°.

Keywords: plasma diagnostics, neutral beams, slit ion optics, geometrical focusing.