

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.663

МИШЕННАЯ КАМЕРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2023 г. К. Е. Прянишников^{a, b}, П. А. Федин^{a, *}, В. К. Семячкин^a,
Р. П. Куйбида^a, А. В. Козлов^a, Т. В. Кулевой^{a, b}

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: fedin@itep.ru

Поступила в редакцию 25.07.2022 г.

После доработки 25.07.2022 г.

Принята к публикации 31.07.2022 г.

Для проведения имитационных экспериментов одновременно двумя пучками ионов (тяжелыми и легкими) разработана и изготовлена мишенная камера. Мишенная камера оборудована элементами диагностики пучка, контроля температуры мишени. В камере предусмотрена установки систем плазменной чистки и азотной ловушки.

Ключевые слова: тяжелые ионы, легкие ионы, ионный ускоритель, имитационное облучение, плазменная чистка, азотная ловушка

DOI: 10.56304/S2079562922050372

ВВЕДЕНИЕ

Во время эксплуатации ядерных и термоядерных реакторов у их конструкционных материалов под воздействием нейтронных потоков изменяется микроструктура. Изменение микроструктуры ведет к изменению физических свойств конструкционных материалов, в частности проявляются эффекты набухания и охрупчивания этих материалов. Именно поэтому особо важно при разработке конструкционных материалов реакторов исследовать их радиационную стойкость. Однако, проведение таких исследований на нейтронных потоках, во-первых, требует колоссальных временных затрат, а во-вторых, полученная наведенная радиоактивность осложняет исследование свойств этих материалов после облучения. Экспресс-метод оценки радиационной стойкости, базирующийся на имитационных экспериментах на ускоренных ионных пучках, позволяет провести предварительную оценку стойкости материалов. Поскольку основной вклад в образование дефектов в материале вносят каскадные взаимодействия выбитого нейтроном первичного атома кристаллической решетки, то использование в качестве такого первично выбитого атома ускоренных ионов позволяет повысить скорость формирования дефектов. Это обусловлено тем фактом, что сечение взаимодействия иона с атомами решетки на несколько порядков превышает сечение взаимодействия нейтрона с этим атомом. Наиболее часто для такого эксперимента используют пучки

ионов железа. Для того чтобы промоделировать влияние на физические свойства конструкционного материала продуктов ядерных реакций, происходящих в результате взаимодействия нейтрона с атомом кристаллической решетки, необходимо в область формирования дефектов вводить атомы гелия или водорода [1].

В Курчатовском комплексе теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) НИЦ “Курчатовский институт” с 2007 г. на ускорителе тяжелых ионов ТИПр (ТяжелоИонный Прототип) [2] проводятся имитационные эксперименты на пучках ионов Fe^{2+} [3]. Ускоритель работает с длительностью импульса пучка 475 мкс при частоте посылов один импульс в две секунды. Ионы на выходе ускорителя имеют энергию 101 кэВ/нуклон.

Для изучения влияния продуктов ядерных реакций на установке создается второй канал, который позволит имплантировать в область формирования дефектов атомы гелия или водорода. Требования к пучку легких ионов определены в статье [4]. Угол между нормалью к образцу и осью каждого из двух пучков составляет 15° . Схема установки представлена на рис. 1. В данной работе представлена конструкция мишенной камеры для обеспечения двухпучковых экспериментов и результаты ее изготовления и тестирования.

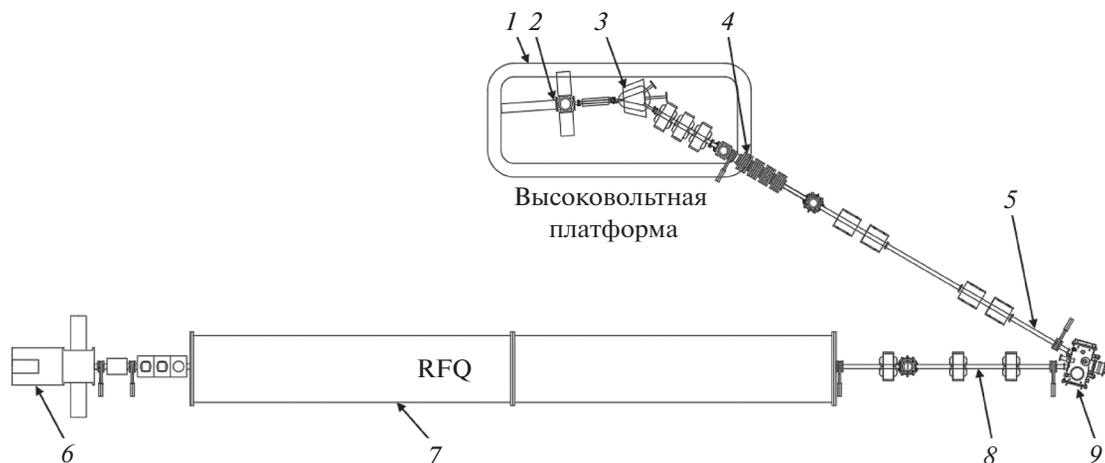


Рис. 1. Схема двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр-1: 1 – высоковольтная платформа, 2 – источник ионов на основе ЭЦР разряда, 3 – поворотный магнит, 4 – электростатический ускоритель, 5 – канал транспортировки легких ионов, 6 – вакуумно-дуговой источник ионов металлов, 7 – ускоряющая структура Radio-Frequency Quadrupole, 8 – канал транспортировки тяжелых ионов, 9 – мишенная камера.

КОНСТРУКЦИЯ МИШЕННОЙ КАМЕРЫ

Для проведения облучательных экспериментов разработана мишенная камера. При разработке камеры учитывались следующие требования. Мишенная камера должна обеспечить одновременное облучение двумя пучками образца при его нагреве вплоть до 700°C при стабильности температуры не хуже 10°C [5]. Для контроля температуры образцов в ходе эксперимента необходимо предусмотреть измерение температуры при помощи термопары и тепловизора. Вакуум в области установки мишени должен быть $\leq 1 \cdot 10^{-7}$ торр. В камере необходимо предусмотреть возможность установки криоэкрана и устройства для плазменной очистки. В работе [6] показано, что использование криоэкрана и плазменной очистки внутренней поверхности мишенной камеры заметно снижает влияние атомов остаточного газа на чистоту эксперимента. В камере на оси каждого из пучков должны быть размещены элементы системы диагностики, а именно цилиндр Фарадея и профилометр для настройки и контроля тока, положения и профиля любого из пучков. Поскольку в ходе облучения планируется использовать профилометры для онлайн-контроля за набираемым флюенсом, их конструкция должна обеспечить беспрепятственное прохождение пучка на поверхность облучаемого образца. Камера должна обеспечивать удобство монтажа и демонтажа образцов и быстроту выхода на рабочий вакуум. Камера должна иметь систему юстировки обеспечивающую ее установку таким образом, чтобы облучаемая поверхность образца находилась в точке пересечения осей пучков.

Общий вид разработанной мишенной камеры показан на рис. 2. Мишенная камера представляет собой цилиндрическую обечайку, устанавливаемую на подставку с возможностью юстировки

по двум перпендикулярным направлениям (10, рис. 2). При установке камеры на рабочее место она юстируется по высоте и углу с использованием средств юстировки (10, рис. 2). Нагрев образцов в мишенной камере будет осуществляться в мишенном блоке, присоединяемом к фланцу (5, рис. 2). Для удобства монтажа кассеты с образцами облучаемого материала на мишенный блок предусмотрены вакуумные двери на боковых торцах камеры (1, 8, рис. 2).

Вакуум обеспечивается турбомолекулярным насосом (ТМН) КУКУ с заявленной производителем скоростью откачки 1300 л/с по азоту и 1000 л/с по гелию. Форвакуумная линия ТМН реализована насосом ISP-500 со скоростью откачки 500 л/мин. Все вакуумно-плотные фланцевые соединения выполнены в виде фланцев ConFlat с медными прокладками, кроме соединений на вакуумных дверях, где используются уплотнения из фторкаучука.

Мишенный блок (11, рис. 2) выполнен в виде цилиндрической обечайки с водоохлаждаемой рубашкой. Для мишенного блока предусмотрена подставка с возможностью отката (9, рис. 2) для доступа к установке образцов на мишень в то время, когда в камере будет установлена азотная ловушка в виде криоэкрана. Для криоэкрана на мишенной камере предусмотрены патрубки ввода и вывода жидкого азота (2, 6, рис. 2). В отсутствие криоэкрана в камере, доступ к установке образцов на место мишени имеется через вакуумные двери.

Источником нагрева образцов в мишенном блоке является нагреватель патронного типа. Измерение температуры мишени осуществляется термопарой типа К, установленной в ее держателе и дистанционно через вакуумное окно из ZnSe тепловизором MAG14HF [7].

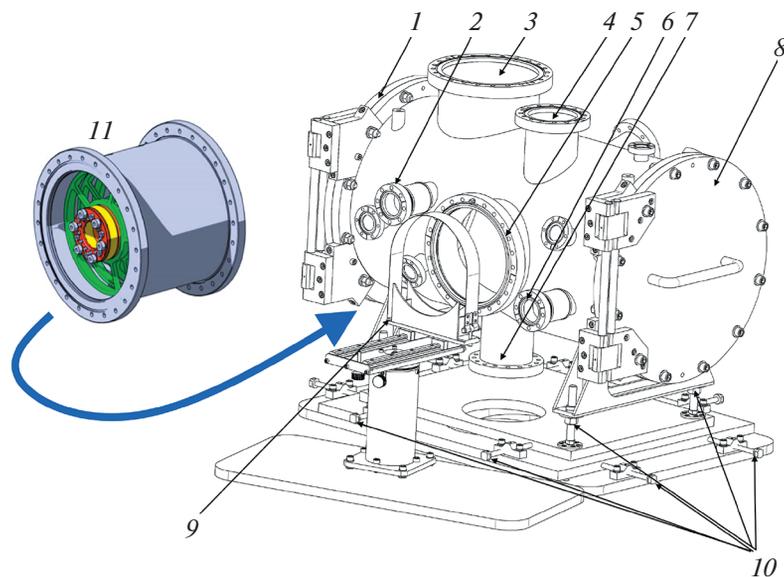


Рис. 2. Чертеж общего вида мишенной камеры со стороны блока нагрева мишени: 1 – вакуумная дверь, 2 – патрубок под вход охладителя криоэкрана, 3 – патрубок под ТМН, 4 – патрубок под цилиндр Фарадея пучка легких ионов, 5 – патрубок под мишенный блок, 6 – патрубок под выход охладителя криоэкрана, 7 – патрубок под цилиндр Фарадея пучка тяжелых ионов, 8 – вакуумная дверь, 9 – подставка под мишенный блок, 10 – средства юстировки, 11 – мишенный блок.

Напротив мишени в камере имеются пять патрубков (1–5, рис. 3). Один из патрубков (2, рис. 3) расположенный прямо напротив мишени предусмотрен для монтажа устройства плазменной чистки. Подобные устройства позволяют быстро и эффективно очистить внутреннюю поверхность камеры от углерода. Разработка устройства плазменной чистки в настоящее время ведется в ККТЭФ.

Другой патрубок (3, рис. 3) предусмотрен для установки смотрового окна из ZnSe с целью наблюдения тепловизором за температурой образцов во время сеанса облучения. Тепловизор MAG 14HF позволяет измерять температуру до 1000°C с частотой 120 Гц с точностью $\pm 2\%$.

Патрубки (1, 4, рис. 3) предназначены для входа пучков легких и тяжелых ионов соответственно. На данные патрубки устанавливаются пневматические вакуумные шиберы для отсечения вакуумного объема мишенной камеры от остальной установки во время смены мишеней.

УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ

Устройства диагностики пучка мишенной камеры представлены профилометрами и цилиндрами Фарадея на каждом из пучков. Под каждый формфактор облучаемых образцов будет использоваться свой набор профилометров. Профилометры устанавливаются в специальные держатели в патрубки входа пучков (1, 4, рис. 3). Чертеж профилометра под один из возможных типов образца показан на рис. 4. Изоляция горизонталь-

ных и вертикальных ламелей выполнена из термостойкой керамики.

Цилиндры Фарадея устанавливаются на вакуумных вводах, что позволяет проводить установку пучка на образец и проводить калибровку измерений с профилометра.

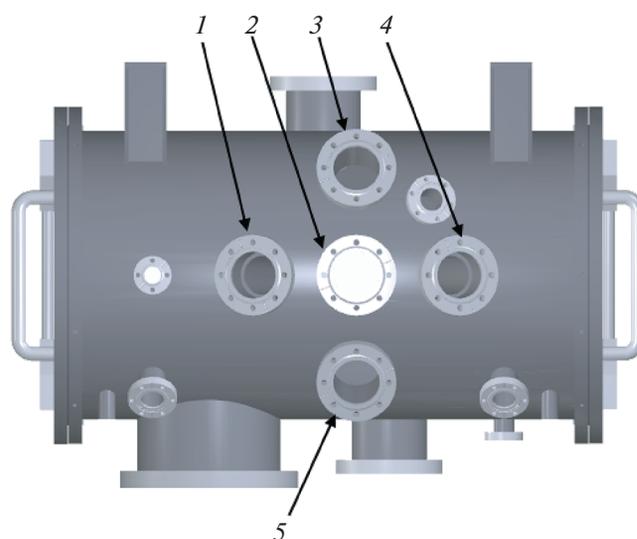


Рис. 3. Вид мишенной камеры со стороны входа пучков: 1 – вход пучка легких ионов, 2 – патрубок под устройство плазменной чистки, 3 – вакуумное окно под тепловизор, 4 – вход пучка тяжелых ионов, 5 – патрубок для ПЗС-камеры.

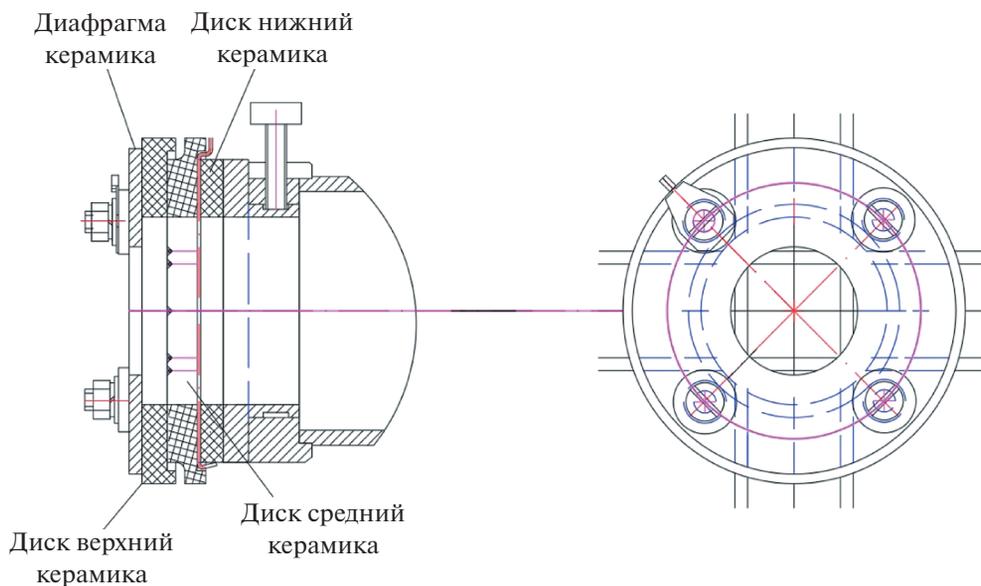


Рис. 4. Чертеж профилометра.

ИСПЫТАНИЕ МИШЕННОЙ КАМЕРЫ

Мишенная камера была изготовлена в ООО «ВСТ» [8]. После получения с производства мишенной камеры был сооружен испытательный стенд (рис. 5) на основе турбомолекулярного на-

соса КУКУ со скоростью откачки 1300 л/с. Патрубки каналов вводов пучка были закрыты пневмошиберами, на остальных фланцах были установлены заглушки. Камера была откачана до давления $2.5 \cdot 10^{-7}$ торр за 12 ч. Проведена провер-

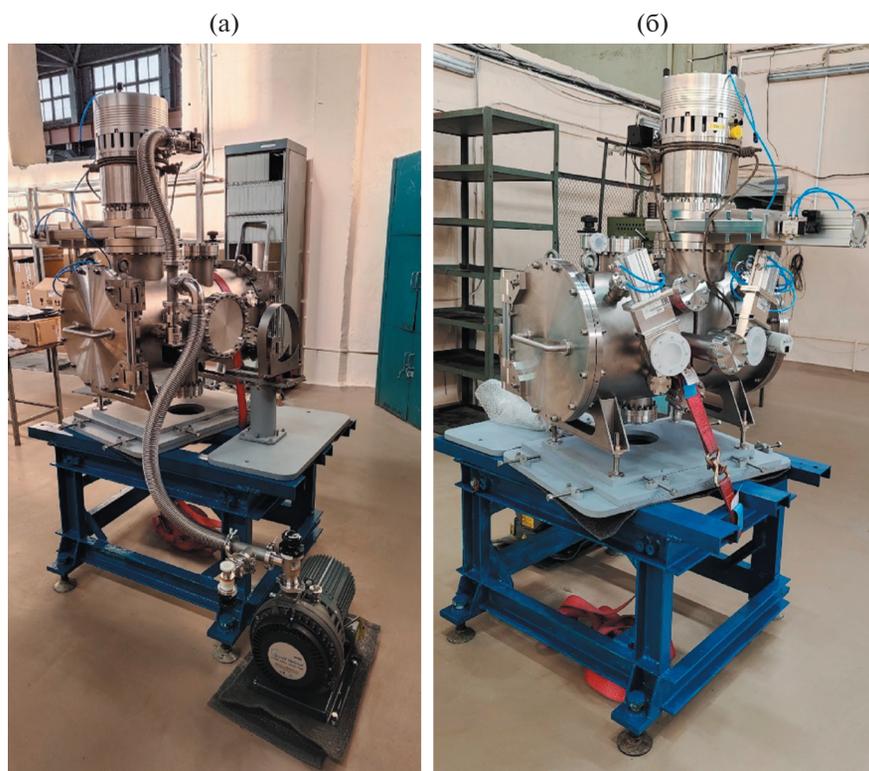


Рис. 5. Стенд испытаний вакуумной камеры: (а) вид со стороны мишенного блока, (б) вид со стороны входа пучков.

ка камеры на герметичность с использованием гелиевого течеискателя с пределом чувствительности $5 \cdot 10^{-13}$ Па·м³/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания установки по облучению образцов конструкционных материалов двумя пучками ионов разработана мишенная камера. Разработанная мишенная камера позволяет обеспечить проведение имитационных экспериментов в полном соответствии со стандартной практикой исследования последствий повреждения нейтронным излучением с использованием облучения заряженными частицами [5]. В настоящее время камера проходит тестирование и ожидает комплектации всеми средствами диагностики, которые находятся в стадии разработки.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Кубанкину Александру Сергеевичу и всему коллективу ООО “ВСТ” за участие в процессе разработки мишенной камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Hoang T.L., Nazarov R., Kang C., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2018. V. 427. P. 9–13.
2. Kashinsky D., Kolomiets A., Kulevoy T., et al. // Proc. European Particle Accelerator Conf. EPAC. 2000. P. 854.
3. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9 (3). С. 245–258 [Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Khomich A.A., et al. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82 (9). P. 1239–1251].
4. Fedin P.A., Ziatdinova A.V., Pryanishnikov K.E., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012073.
5. ASTM E521-16. Standard Practice for Investigating the Effects of Neutron Radiation Damage Using Charged-Particle Irradiation. 2016.
6. Was G.S. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2017. V. 412. P. 58–65.
7. <https://www.magnity.com.cn/product/id/2.html>.
8. <http://vst-company.ru/>.

Target Chamber for Simulation Experiments

K. E. Pryanishnikov^{1, 2}, P. A. Fedin¹ *, V. K. Semyachkin¹,
R. P. Kuibida¹, A. V. Kozlov¹, and T. V. Kulevoy^{1, 2}

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

²National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: fedin@itep.ru

Received July 25, 2022 revised July 25, 2022; accepted July 31, 2022

Abstract—A target chamber has been developed and manufactured for carrying out simulation experiments with two simultaneous beams of heavy and light ions. The target chamber is equipped with elements for beam diagnostics and target-temperature control. The chamber allows the installation of plasma cleaning systems and nitrogen trap.

Keywords: heavy ions, light ions, ion accelerator, simulated irradiation, plasma cleaning, nitrogen trap