

УДК 621.384.6

ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В.В. Куркучев¹, Н. Абед^{1,3}, А.В. Иванов^{1,3}, И.В. Кандауров¹, Д.А. Никифоров^{1,2}

¹*Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия*

³*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Дивертор является одним из наиболее энергонагруженных элементов конструкции экспериментального токамака ИТЭР. При штатных режимах работы токамака дивертор испытывает как стационарные тепловые нагрузки, так и быстрые тепловые удары вследствие переходных процессов в плазме. Наибольшую опасность для целостности дивертора представляют ЭЛМы — квазипериодические неустойчивости в приграничной области плазмы. В настоящее время для смягчения вызываемых ЭЛМ-термоударов выбран подход, заключающийся в уменьшении энергосодержания в отдельном ЭЛМ за счёт увеличения их частоты (до 30—60 Гц). При этом из-за высокой частоты следования импульсов ожидается $\sim 10^8$ ЭЛМ-событий в течение предполагаемого срока службы дивертора. Столь большое количество импульсов может приводить к термоциклической усталости материала дивертора, появлению сети микротрещин и оплавлению вольфрама по краям этих трещин вследствие нарушения теплопроводности. В ИЯФ СО РАН разрабатывается экспериментальный стенд для изучения усталостной стойкости материалов для облицовки дивертора и первой стенки под действием ЭЛМ-подобных тепловых ударов при общем количестве последних $\geq 10^7$. Для имитации тепловых ударов предполагается использовать электронный пучок, работающий в частотно-импульсном режиме. В представляемой статье приводятся описание прототипа источника электронного пучка для материаловедческих исследований и результаты характеристики его параметров на испытательном стенде. В экспериментах был получен ток пучка 10 А при величине ускоряющего напряжения 19 кВ. Продемонстрирована работа источника с частотой до 10 Гц при длительности импульса 1 мс. С помощью изображающей диагностики на основе люминесцентной керамики было измерено распределение тока по сечению пучка при транспортировке в расходящемся магнитном поле. Достигнутые параметры соответствуют удельной мощности 1,27 ГВт/м², что удовлетворяет требованиям к пучку для материаловедческих приложений в интересах будущих установок термоядерного класса.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, накаливаемый катод, вольфрамовый дивертор, переходные тепловые нагрузки.

REPEATED PULSE ELECTRON BEAM SOURCE FOR MATERIALS TEST APPLICATIONS

V.V. Kurkuchekov¹, N. Abed^{1,3}, A.V. Ivanov^{1,3}, I.V. Kandaurov¹, D.A. Nikiforov^{1,2}

¹*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*Center for Collective Use Siberian Circular Photon Source of the Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center Institute of Catalysis named after G.K. Boreskov of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

³*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Divertor is one of the most energy-loaded elements of the ITER experimental tokamak. During the ITER operation, the divertor experiences both stationary thermal loads and rapid thermal impacts due to transient processes in the plasma. The potentially most harmful transients during normal operation are edge-localized modes (ELMs). To mitigate the thermal impacts caused by ELMs, a current approach involves reducing the energy content of individual ELM by increasing their frequency (up to 30—60 Hz). Due to the high pulse repetition rate, $\sim 10^8$ ELM events are expected during the foreseen lifetime of the divertor components. Such a large number of pulses can lead to thermocyclic fatigue of the divertor material, the formation of a microcracks network and melting along the cracks edges due to heat conduction failure. In the BINP, an experimental stand to study the plasma-faced materials performance under the influence of a large ($\geq 10^7$) number of ELM-like thermal impacts is developing. To simulate the thermal impact on the material surface, a pulsed electron beam is planned to use. In the present article, the prototype of an electron beam source for materials test research and the results of the beam characterization experiments are described. In experiments on electron beam generation, a beam current of 10 A at an accelerating voltage of 19 kV was achieved. The beam pulse duration of 1 ms at frequencies up to 10 Hz was demonstrated. Using imaging diagnostics based on luminescent ceramics, the beam current distribution was measured. The achieved beam parameters correspond to a specific power of 1.27 GW/m², which meets the requirements for materials test applications in the interests of fusion-class facilities.

Key words: repeated electron beam pulses, thermionic cathode, tungsten divertor, transient thermal loads.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-2-73-79

ВВЕДЕНИЕ

Ключевая проблема для перспективных токамаков реакторного класса — выбор материалов, способных противостоять тепловым нагрузкам, обусловленным интенсивными потоками плазмы и частиц на об-

ращённые к плазме поверхности вакуумной камеры установки. Наибольший уровень тепловых нагрузок на стенку токамака имеет место в области дивертора. Для крупнейшего строящегося токамака ИТЭР в 2013 г. в качестве единственного материала облицовки дивертора был выбран вольфрам [1, 2], поскольку он обладает высокой температурой плавления, устойчив к распылению и низкому накоплению трития.

Работа токамака в режимах с высоким коэффициентом термоядерного усиления $Q_{DT} = 10$ (что является целью для ИТЭР) связана с возникновением так называемых ЭЛМ-событий [3] (англ. ELM — Edge Localized Modes) — квазипериодических неустойчивостей в приграничной области плазмы, приводящих к быстрым выбросам энергии и частиц на поверхность обращённых к плазме элементов облицовки дивертора и первой стенки. Таким образом, суммарная тепловая нагрузка на поверхность материала складывается из стационарной нагрузки (принята ~ 10 МДж·м⁻² в диверторе ИТЭР) и быстрых тепловых ударов вследствие ЭЛМ-событий.

Для больших токамаков естественная частота возникновения ЭЛМов находится на уровне 1—3 с⁻¹ [4] при характерной длительности термоудара в диапазоне сотен микросекунд. Для ИТЭР нагрузка на облицовку дивертора при неуправляемых ЭЛМах оценивается на уровне ≥ 2 МДж·м⁻² при характерном времени достижения максимальной температуры поверхности 0,5 мс [5, 6]. Такой уровень нагрузок находится много выше порога плавления вольфрама и является заведомо неприемлемым. Соответственно необходимо использование тех или иных способов «смягчения» ЭЛМ-нагрузок.

В настоящее время задача смягчения вызываемых ЭЛМ-термоударов рассматривается по двум направлениям: полное устранение таких событий (что, видимо, вряд ли достижимо в режимах с $Q_{DT} = 10$) либо уменьшение энергосодержания в отдельных ЭЛМах за счёт искусственного увеличения частоты возникновения последних. На основании результатов экспериментов с плазменными ускорителями [7] для вольфрамового дивертора ИТЭР был принят предельный уровень нагрузки 0,5 МДж·м⁻² в единичном ЭЛМе, что соответствует частоте контролируемых ЭЛМов в диапазоне 30—60 с⁻¹ [5].

Тепловые нагрузки выше порога плавления вольфрама (около 1,1 МДж·м⁻² при длительности 0,5 мс) способны вызвать повреждение облицовки дивертора ИТЭР вследствие буквально единичного ЭЛМ-события. Однако даже ЭЛМы с энергосодержанием кратно ниже порогового при большом количестве повторений вызывают термоциклическую усталость материала, приводящую к деформации поверхности, появлению сети микротрещин и оплавления вольфрама по краям этих трещин вследствие нарушения теплопроводности.

Детально эти явления были изучены в экспериментах на установке JUDIT 2 [8] в Юлихском исследовательском центре, где быстрый нагрев вольфрамовой мишени производился сфокусированным электронным пучком, сканирующим поверхность образца площадью около 1 см² по специальному алгоритму [9]. Было показано, что нагрузки на уровне 0,13 МДж·м⁻², с частотой 25 с⁻¹ при длительности нагрева 0,48 мс приводят к образованию сети микротрещин на поверхности вольфрама после 10⁶ термоударов [10, 11].

Вместе с этим, как было указано в работе [6], при частоте контролируемых ЭЛМов в десятки герц 10⁶ ЭЛМ-событий набираются менее чем за 100 рабочих разрядов ИТЭР в термоядерном режиме. Таким образом, вопрос об устойчивости вольфрамовой облицовки к длительным циклическим ЭЛМ-нагрузкам сравнительно малой мощности на протяжении срока службы дивертора ИТЭР ($\sim 8 \cdot 10^6$ с в термоядерной фазе) оставляет простор для исследований.

В ИЯФ СО РАН ранее была создана установка ВЕТА (Beam of Electrons for materials Test Applications) [12, 13] на основе источника электронного пучка с плазменным катодом. Задачей установки являлось изучение *in situ* процессов, происходящих на поверхности вольфрама при импульсных тепловых нагрузках, сопоставимых с ожидаемыми в ИТЭР. Электронный пучок позволял моделировать термоудары на площади 1—2 см² длительностью от 0,1 до 1 мс с уровнем нагрузки как заведомо ниже порога плавления вольфрама, так и значительно выше, вплоть до разбрызгивания материала. Существенным недостатком установки является низкая частота повторения импульсов (0,02 с⁻¹).

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разрабатывается экспериментальный стенд для изучения усталостной стойкости тугоплавких материалов для облицовки дивертора и первой стенки под действием ЭЛМ-подобных тепловых ударов при общем количестве последних $\geq 10^7$.

Для имитации теплового воздействия на поверхность предполагается использовать электронный пучок, работающий в частотно-импульсном режиме. В общем виде концепция работы экспериментального стенда заключается в следующем: пучок, сформированный в электронной пушке с термокатодом, транспортируется в ведущем магнитном поле на испытываемую мишень и одновременно создаёт равномерную тепловую нагрузку на поверхности последней в области площадью около 1 см^2 . Для обеспечения тепловых нагрузок на уровне $0,5 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ на поверхности вольфрамовой мишени требуется мощность электронного пучка 80 кВт при длительности импульса 1 мс (исходя из площади отпечатка пучка на мишени, равной 1 см^2 , и с учётом коэффициента поглощения энергии падающего пучка $\approx 0,6$ для вольфрама). Для уменьшения фона сопутствующего тормозного излучения и удешевления конструкции модулятора ускоряющего напряжения энергию электронов целесообразно выбрать не выше 30 кэВ . Частота следования импульсов пучка должна быть не ниже $20\text{—}30 \text{ с}^{-1}$, что позволит достичь необходимого числа импульсов тепловой нагрузки на мишени за разумное экспериментальное время.

В представляемой статье приводятся описание прототипа источника электронного пучка для материаловедческих исследований и результаты измерения его параметров на испытательном стенде.

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Схема экспериментального стенда для измерения характеристик электронного пучка показана на рис. 1. В состав стенда входят вакуумная камера с внешней катушкой магнитного поля, электронная пушка с термокатодом, высоковольтный модулятор и системы питания накала пушки и магнитного поля, а также система регистрации параметров пучка.

Электронная пушка на основе термокатода с косвенным накалом была разработана и изготовлена в ИЯФ СО РАН. Пушка предназначена для работы в ведущем магнитном поле и позволяет использовать широкую номенклатуру катодных узлов с эмиттером из LaB_6 , разработанных в ИЯФ СО РАН [14, 15] (рис. 2).

Катоды из гексаборида лантана обладают высокой плотностью тока эмиссии, сравнительно мало чувствительны к плохим вакуумным условиям, отравлению кислородом, парами воды и при эксплуатации в рабочем диапазоне температуры $1650\text{—}2200 \text{ К}$ имеют рабочий ресурс более 1000 ч [16]. Для первых экспериментов была выбрана кольцевая форма эмиттера для достижения большего первеанса, транспортируемого на коллектор пучка. Внешний диаметр эмиттера составил 16 мм , внутренний — 8 мм . Величина ускоряющего зазора составляет $7,8 \text{ мм}$.

Генерация и транспортировка электронного пучка происходили в стационарном аксиально-симметричном ведущем магнитном поле, создаваемом внешней катушкой с внутренним диаметром обмотки 280 мм и внешним — 507 мм . Катушка содержит 288 витков медной шины $8 \times 8 \text{ мм}$ с внутренним каналом диаметром 5 мм для прокачки охлаждающей дистиллированной воды. Ин-

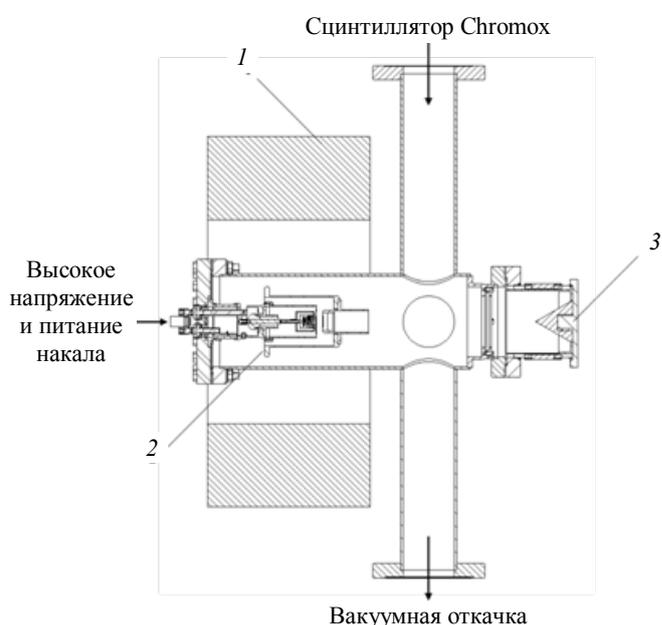


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — катушка магнитного поля; 2 — электронная пушка с термокатодом; 3 — цилиндр Фарадея

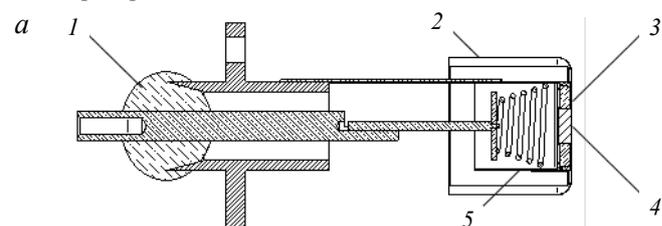


Рис. 2. Схема катодного узла: 1 — проходной изолятор; 2 — тепловые экраны; 3 — вставка LaB_6 ; 4 — центральная вставка (тантал с графитовой оправой); 5 — накальный элемент (спираль из вольфрама) (а); фото катодных узлов с различной геометрией эмиттирующей области (б)

дукция магнитного поля в среднем сечении на оси составляет 80 мТл на 100 А тока в обмотке. Питание катушки производилось от регулируемого источника постоянного тока MeanWell RST-10000-48, который позволяет получать максимальный ток в нагрузке до 200 А. Тепловыделение в катушке при токе 100 А составляет 1,3 кВт.

Схема питания источника пучка показана на рис. 3. Модулятор, формирующий импульсы ускоряющего напряжения, работает по принципу частичного разряда накопительной ёмкости. Коммутация накопителя на нагрузку производится с помощью разработанного в ИЯФ СО РАН высоковольтного ключа на основе 12 последовательно соединённых IGBT-транзисторов IXEL40N400. Модулятор позволяет формировать квазипрямоугольные импульсы ускоряющего напряжения амплитудой до 30 кВ, длительностью от 20 мкс, с частотой повторения до 100 Гц. Управление транзисторным ключом производится по оптоволокну, длительность ускоряющих импульсов и интервал между ними задаются программным образом. Средняя мощность генерируемого пучка ограничивается в первую очередь мощностью высоковольтного выпрямителя, заряжающего ёмкостной накопитель. Для зарядки последнего использовался источник питания ИПЭ-6-30-1.1 (30 кВ, 6 кВт) производства компании «Инситек» (Томск).

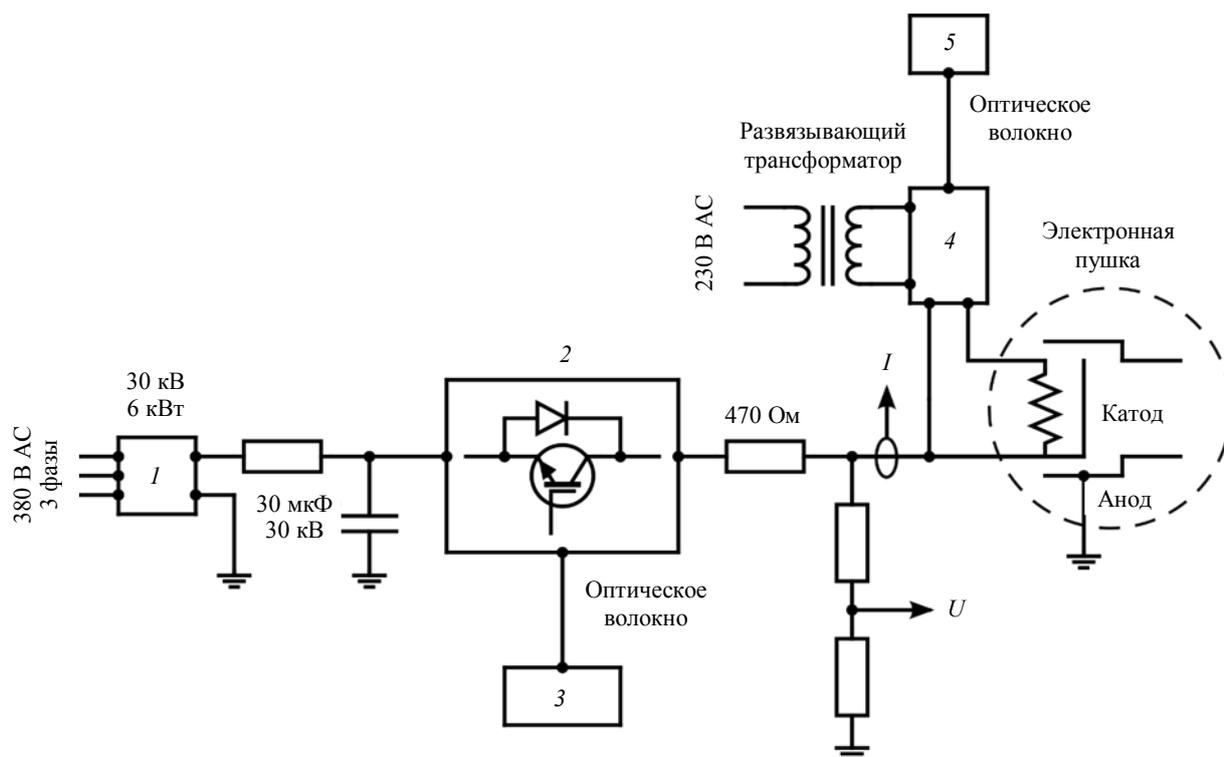


Рис. 3. Схема питания источника электронного пучка: 1 — высоковольтный источник ИПЭ-6-30-1.1; 2 — транзисторный ключ; 3 — генератор управляющих импульсов; 4 — питание накала катода; 5 — управление накалом

Питание накала катода производилось постоянным током с помощью регулируемого источника MeanWell SPV-300-12. Источник тока и система управления накалом смонтированы на изолированной платформе и при работе источника находятся под ускоряющим потенциалом. Управление током накала осуществляется по оптическому каналу Ethernet. Максимально возможная мощность накала составляет 300 Вт.

Вакуумная камера с уплотнениями из меди прогревалась и откачивалась до остаточного давления $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Па турбомолекулярным и магниторазрядным насосами. При работе с пучком турбомолекулярный насос выключался из-за опасения воздействия на него рассеянного поля магнитной катушки. Типичное остаточное давление в камере при работе с пучком было на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ Па.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Зависимость между мощностью накала и температурой катода находилась с помощью яркостного оптического пирометра ЭОП-66 [17] на специальном стенде. Температура на поверхности LaB₆-эмиттера около 1900 К достигалась при мощности накала 270 Вт. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) электронного пучка проводилось при величине магнитного поля в центре катушки

0,08 Тл. Источник работал с длительностью импульса 1 мс на частоте 1 Гц из-за ограничения по тепловой нагрузке на цилиндр Фарадея (кратковременно производились включения на частоте 10 Гц). Ускоряющее напряжение измерялось резистивным делителем, ток в цепи ускоряющего напряжения и ток на цилиндр Фарадея измерялись с помощью датчиков типа LEM LF 210. На рис. 4 показаны ВАХ электронной пушки при различных температурах катода.

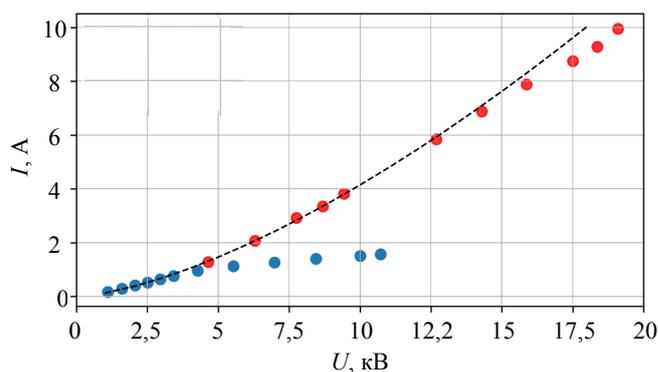


Рис. 4. Вольтамперная характеристика диодной пушки с кольцевым катодом для различных температур поверхности катода: ---- — Ultra Sam, ● — 1600, ● — 1900 К

Пунктиром изображена расчётная ВАХ в режиме работы с ограничением тока эмиссии пространственным зарядом. Численное моделирование выполнялось с помощью программного пакета UltraSAM [18] для реальной геометрии пушки, вакуумной камеры и магнитного поля. Расчётный микропереванс пучка был равен 4,28 мк. Экспериментальные данные, полученные при температуре катода около 1600 К, показаны синими кружками (см. рис. 4). Видно, что для этой температуры при напряжении около 5 кВ пушка переходит в режим работы с ограничением тока эмиссионной способностью катода. При температуре катода около 1900 К ВАХ совпадает с расчётной практически во всём диапазоне ускоряющих напряжений. Максимальный ток пучка 10 А был достигнут при напряжении на катоде 19 кВ, что соответствует удельной мощности в пучке 1,27 ГВт/м² (в пересчёте на площадь LaV₆-эмиттера).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ПУЧКА

В контексте моделирования тепловых нагрузок важно знать распределение мощности электронного пучка на исследуемом образце. Пушка с кольцевым катодом была спроектирована из расчёта получения равномерного распределения плотности тока в кольцевом сечении пучка. Для экспериментального изучения данной характеристики была создана визуализирующая диагностика на основе сцинтиллятора Chromox AF995R [19], который представляет собой пластину из корундовой керамики, допированной трёхвалентным хромом, толщиной 1,5 мм и диаметром 80 мм. Этот сцинтиллятор обладает высоким световыходом и хорошо переносит тепловые удары. Для нивелирования эффектов, связанных с накоплением заряда на керамике, на поверхность последней был напылён слой хрома толщиной 20 нм. Пластина сцинтиллятора с помощью вакуумной подвижки вводилась в пучок с наклоном 45° к его оси, свечение регистрировалось быстрой цифровой камерой SDU-285, установленной перпендикулярно направлению пучка.

Для предотвращения быстрой деградации металлического напыления и разрушения сцинтиллятора измерения проводились при сниженной мощности пучка. Типичное изображение пучка в поперечном сечении показано на рис. 5, а. Ток эмиссии здесь составлял 1,5 А при ускоряющем напряжении 10 кВ и

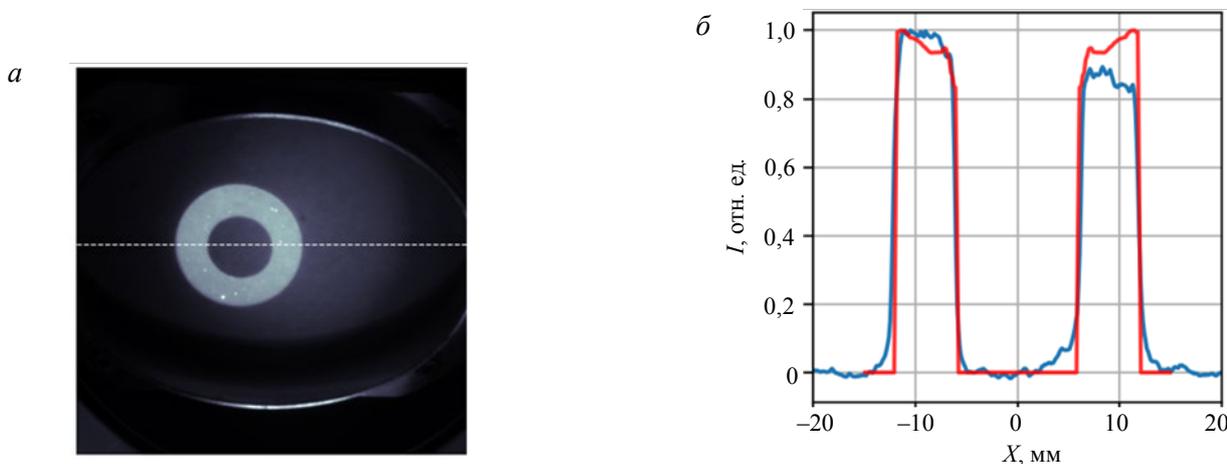


Рис. 5. Снимок отпечатка пучка на сцинтилляторе с металлическим напылением (а) и сравнение фотометрического профиля отпечатка пучка, измеренного экспериментально (—), и распределения плотности тока пучка (—), полученного с помощью численного моделирования (б)

длительности импульса 1 мс. Ведущее магнитное поле имело расходящуюся конфигурацию. Величина магнитной индукции составляла ~ 80 и $33,5$ мТл в области катода и мишени соответственно.

На рис. 5, б показан фотометрический профиль, измеренный вдоль пунктирной линии (см. рис. 5, а), в сопоставлении с результатами численных расчётов, выполненных с помощью пакета UltraSAM. Диаметр пучка на мишени составил 22 мм. Как видно, неравномерность тока в сечении пучка не превышает 20%. Наблюдаемые на снимке яркие точки сохраняют своё местоположение на сцинтилляторе при изменении положения пучка на мишени и, по-видимому, связаны с дефектами металлического напыления. Удовлетворительное совпадение расчётов и результатов измерений создаёт основу для использования имеющихся численных моделей в дальнейшей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан частотно-импульсный источник электронного пучка на основе термокатада с косвенным накалом. В первых экспериментах на испытательном стенде получен ток пучка 10 А при ускоряющем напряжении 19 кВ. Продемонстрирована работа источника на частоте 10 Гц при длительности импульса 1 мс.

С помощью визуализирующей диагностики на основе люминесцентной керамики произведены измерения распределения тока по сечению пучка при транспортировке в расходящемся магнитном поле. Продемонстрировано, что распределение тока пучка однородно по сечению, неравномерность тока не превышает $\sim 20\%$.

Достигнутые параметры пучка соответствуют удельной мощности $1,27$ ГВт/м². Достигнутый уровень плотности мощности удовлетворяет требованиям к пучку для материаловедческих приложений и поддержку проектов будущих установок термоядерного класса.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.А. Садчикову за разработку и изготовление высоковольтного IGBT-ключа, А.Ф. Ровенских за помощь в автоматизации экспериментов и Д.А. Старостенко за любезно предоставленное вакуумное оборудование. Авторы глубоко признательны Л.Н. Вячеславу и Ю.А. Труневу за проявленный интерес к работе и полезные обсуждения.

В части создания диагностик пучка, систем питания накала и магнитного поля, высоковольтного модулятора работа выполнялась при поддержке грантом РФФИ 22-72-00037. В остальной части работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № FWGM-2022-0014, FWUR-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pitts R.A.** A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status. — *J. of Nuclear Materials*, 2013, vol. 438, p. S48—S56.
2. **Hirai T. et al.** Status of technology R&D for the ITER tungsten divertor monoblock. — *Ibid.*, 2015, vol. 463, p. 1248—1251.
3. **Zohm H.** The physics of edge localized modes (ELMs) and their role in power and particle exhaust. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1996, vol. 38, № 8, p. 1213.
4. **Lang P.T. et al.** ELM control strategies and tools: status and potential for ITER. — *Nuclear Fusion*, 2013, vol. 53, № 4, p. 043004.
5. **Loarte A. et al.** Characteristics of type I ELM energy and particle losses in existing devices and their extrapolation to ITER. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2003, vol. 45, № 9, p. 1549.
6. **Pitts R.A. et al.** Physics basis for the first ITER tungsten divertor. — *Nuclear Materials and Energy*, 2019, vol. 20, p. 100696.
7. **Klimov N. et al.** Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. — *J. of Nuclear Materials*, 2009, vol. 390, p. 721—726.
8. **Majerus P. et al.** The new electron beam test facility JUDITH II for high heat flux experiments on plasma facing components. — *Fusion Eng. and Des.*, 2005, vol. 75, p. 365—369.
9. **Loewenhoff T. et al.** Experimental simulation of Edge Localised Modes using focused electron beams-features of a circular load pattern. — *J. of Nuclear Materials*, 2011, vol. 415, № 1, p. S51—S54.
10. **Loewenhoff T. et al.** Tungsten and CFC degradation under combined high cycle transient and steady state heat loads. — *Fusion Eng. and Des.*, 2012, vol. 87, № 7—8, p. 1201—1205.
11. **Linke J. et al.** Performance of different tungsten grades under transient thermal loads. — *Nuclear Fusion*, 2011, vol. 51, № 7, p. 073017.
12. **Vyacheslavov L. et al.** Novel electron beam based test facility for observation of dynamics of tungsten erosion under intense ELM-like heat loads. — *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2016, vol. 1771, № 1.
13. **Vyacheslavov L.N. et al.** Diagnostics of the dynamics of material damage by thermal shocks with the intensity possible in the ITER divertor. — *Physica Scripta*, 2018, vol. 93, № 3, p. 035602.
14. **Son H.J. et al.** Electron gun and collector for RAON EBIS charge breeder. — *J. of Instrumentation*, 2021, vol. 16, № 09, p. T09001.

15. **Kondrashev S. et al.** Advanced EBIS charge breeder for rare isotope science project, — In: Proc. of 7th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'16), 2016, p. 1304—1307.
16. **Kuznetsov G.** High temperature cathodes for high current density. — Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1994, vol. 340, № 1, p. 204—208.
17. **Комитет стандартов, мер и измерительных приборов.** Пирометры оптические. Реестр при ЭОП-66 под № 1530—69. URL: <https://nd-gsi.ru/grsi/010xx/01530-69.pdf>.
18. **Ivanov A.V., Tiunov M.A.** ULTRASAM-2D code for simulation of electron guns with ultra high precision. — In: Proc. of EPAC-2002, Paris, 2002, p. 1634—1636.
19. **McCarthy K.J. et al.** Characterization of the response of chromium-doped alumina screens in the vacuum ultraviolet using synchrotron radiation. — J. of Applied Physics, 2002, vol. 92, № 11, p. 6541—6545.



Виктор Викторович Куркучеков, с.н.с., к.ф.-м.н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия
V.V.Kurkuchekov@inp.nsk.su



Набиль Абед, м.н.с.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГТУ, 630073 Новосибирск, пр-т К. Маркса 20, Россия
N.Abed@inp.nsk.su



Андрей Вячеславович Иванов, с.н.с., к.ф.-м.н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; НГТУ, 630073 Новосибирск, пр-т К. Маркса 20, Россия
A.V.Ivanov@inp.nsk.su



Игорь Васильевич Кандауров, н.с.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия
I.V.Kandaurov@inp.nsk.su



Данила Алексеевич Никифоров, н.с., к.ф.-м.н.; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 11, Россия; ИК СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева 5, Россия
D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2024 г.

После доработки 6 апреля 2024 г.

Принята к публикации 10 апреля 2024 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 2, с. 73—79.