

УДК 621.039.63

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАДИОЛЮМИНОГРАФИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ КОЛИЧЕСТВ ТРИТИЯ В ЭЛЕКТРОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

© 2022 г. Н. П. Бобырь^{a, b}, Т. А. Анфимова^{a, c, *}, Б. В. Иванов^a, А. С. Аникин^b, И. Г. Лесина^b, А. А. Семенов^b, Н. Е. Забирова^b, А. С. Крюкова^b, А. Н. Букин^{b, c}, А. В. Лизунов^b

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

^bАО “Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара”, Москва, 123098 Россия

^cРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047 Россия

*E-mail: Anfimova_TA@nrcki.ru

Поступила в редакцию 30.05.2022 г.

После доработки 03.06.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

Актуальность исследований взаимодействия изотопов водорода с материалами термоядерного реактора обусловлена в первую очередь вопросами экономики и безопасности. Особенно важным является изучение влияния дефектов в материалах на накопление водорода. В данной работе продемонстрирована возможность применения метода радиолюминографии для анализа распределения малых количеств трития в электронно-индуцированных дефектах вольфрама. Установлена чувствительность данного метода к величине электронно-индуцированных дефектов с точки зрения обнаружения накопленного в них трития. Поскольку особенности метода позволяют проводить анализ исследуемых материалов многократно, был выполнен повторный анализ образцов вольфрама для оценки изменения распределения трития после длительного хранения на атмосфере.

Ключевые слова: тритий, радиолюминография, фотостимулированная люминесценция, распределение трития, вольфрам, электронно-индуцированные дефекты

DOI: 10.56304/S2079562922030071

Развитие термоядерной энергетики приводит к необходимости поиска материалов для термоядерного реактора, отвечающих жестким требованиям в соответствии с условиями их эксплуатации и нормами безопасности. Среди критериев выбора конструкционных материалов и материалов, обращенных к плазме, важное место занимают характеристики взаимодействия с изотопами водорода, поскольку воздействие интенсивных потоков дейтерия и трития на стенки вакуумной камеры будет сопровождаться захватом изотопов водорода в металлах и сплавах, а так же диффузией сквозь стенку. Такие процессы могут приводить к выходу радиоактивного трития в теплоноситель, а также нарушению баланса топлива в реакторе. Важность изучения удержания водорода материалами обусловлена, прежде всего, экономическими соображениями и безопасностью, так как в случае возникновения аварийной ситуации высок риск выделения трития из материалов.

К числу кандидатных материалов, используемых в настоящих и будущих реакторах (ИТЕР [1], ДЕМО [2]), относится вольфрам, поскольку он обладает наиболее высокой температурой плавления среди металлов, высокой теплопроводностью, хорошей стойкостью к распылению, низким радиационным распуханием, механической прочностью [3]. При горении плазмы в термоядерном реакторе, помимо воздействия высоких тепловых нагрузок и интенсивных потоков изотопов водорода, вольфрам будет подвержен облучению образующимися продуктами D–T реакции — ионами гелия с энергией 3.5 МэВ и нейтронами с энергией 14.1 МэВ [4, 5]. Воздействие ионов и нейтронов будет приводить к созданию в материалах дефектов, являющихся дополнительными ловушками для захвата водорода. В связи с этим приобретают актуальность исследования влияния нейтронно-индуцированных повреждений на накопление изотопов водорода в материалах термоядерного реактора. В связи со сложностью экспериментальных исследований нейтронно-



Рис. 1. Блок – схема эксперимента.

облученных образцов наработка дефектов в структуре материалов осуществляется путем облучения тяжелыми ионами, легкими ионами (протонами, углеродом) и электронами [6–9].

В рамках данной работы было проведено исследование удержания трития в вольфраме, облученном электронами. Данный метод позволяет обеспечить равномерное распределение дефектов по глубине материала (~1 мм). Стоит отметить, что скорость наработки дефектов при таком методе очень невысока и составляет 10^{-8} – 10^{-7} смещений на атом в секунду (сна/с), и ограничивается нагревом облучаемого образца. Для оценки распределения трития в вольфраме использовались методы радиолуминографии и регистрации тормозного излучения. Указанные методы применялись в работах по изучению влияния облучения ионами гелия [10], плазмой (TEXTOR) [11] на удержание трития в вольфраме. Целью данной работы является демонстрация принципиальной возможности применения данных методов для изучения влияния дефектов материала, созданных облучением малым потоком электронов, на удержание трития. Важной задачей данного ис-

следования является определение чувствительности указанных методов к небольшим количествам трития, накапливаемым в таких дефектах.

В работе приведены результаты исследования распределения трития в вольфраме непосредственно после насыщения из газовой фазы, а также после длительного (~2 г) хранения. Возможность повторного анализа образцов обеспечивается тем, что используемые методы радиолуминографии и регистрации тормозного излучения являются неразрушающими и не оказывающими влияния на тритий, удерживаемый в материале.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Данная работа состояла из нескольких последовательных этапов. Блок-схема эксперимента представлена на рис. 1.

Для исследования в данной работе использовались три образца вольфрама ($10 \times 10 \times 1$ мм³), изначально рекристаллизованные при температуре 1673 К в течение 1 ч с целью уменьшения содержания естественных дефектов. Два образца были подвергнуты облучению электронами до интегральных доз $7 \cdot 10^{21}$ и $7 \cdot 10^{22}$ e/м², что в пересчете на повреждающую дозу составляет $4 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-4}$ сна соответственно. На рис. 2 представлен расчетный профиль распределения дефектов по толщине образца. В ходе облучения температура образцов не превышала 150°C. На рис. 2 более высокий уровень повреждений в начале профиля соответствует лицевой стороне образца, обращенной к облучающему потоку. Подробная методика электронного облучения представлена в работе [12].

После облучения образцы вольфрама насыщались тритием в вакуумной установке путем выдержки в газе при температуре 523 К и давлении $8 \cdot 10^5$ Па в течение 48 ч. Образец устанавливался в камеру насыщения таким образом, чтобы насыщение тритием происходило со всех его сторон. Газовые магистрали установки предварительно прогревались и откачивались с помощью высоковакуумного турбомолекулярного поста. Подача трития в установку осуществлялась из хранилища с

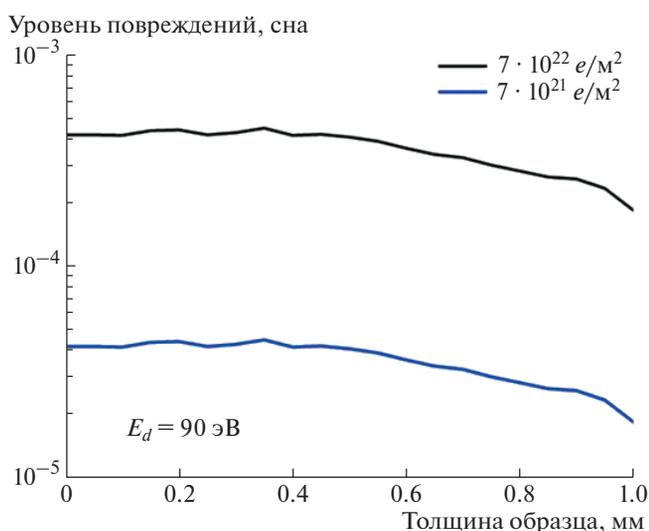


Рис. 2. Расчетный профиль распределения дефектов по толщине образца.

гидридообразующим материалом ZrCo. Давление водорода в камере насыщения измеряется с помощью датчиков избыточного давления “ОВЕН”. Режим нагрева установки программируется контроллером температуры “Термолюкс”. Концентрация трития может быть определена с помощью ионизационной камеры и по показаниям квадрупольного масс-спектрометра OMNIStar. Во избежание утечки трития в рабочее помещение камера насыщения заключена во внешний герметичный корпус, оснащенный датчиками давления и температуры [13]. Герметичный корпус имеет выход на проточную ионизационную камеру для контроля содержания трития, в качестве газа-заполнителя герметичного корпуса использовался аргон.

После насыщения тритием образцы были извлечены из установки и исследованы методом радиолюминографии [14]. Данный метод основан на применении специальных фотопластин, выступающих в качестве двумерных датчиков тритиевого излучения. Далее в статье для обозначения данных пластин будет использоваться традиционное для англоязычной литературы сокращение “IP” (Imaging Plate) [15].

Получение изображения на фотостимулированных материалах по аналогии с обычными фотоэмульсиями представляет собой двухступенчатый процесс [16]. Первый этап – получение скрытого изображения – представляет собой образование дырочных и электронных F-центров в кристаллах фотостимулированного материала IP-пластины при воздействии электронов, образующихся при β -распаде трития. Чтобы достигнуть поверхности пластины, глубина образца, с которой испускаются электроны, должна быть меньше или равна длине свободного пробега электрона с максимальной энергией излучения (18.6 кэВ). Поэтому для получения картины распределения трития по толщине образцов вольфрама были сделаны поперечные срезы образцов толщиной 1 мм. Срезы насыщенных тритием образцов выдерживались на IP – пластине в течение 1 мин, чтобы получить скрытое изображение распределения трития. Второй этап – проявление скрытого изображения – основан на испускании квантов света определенной длины волны при воздействии света постоянной интенсивности на поверхность IP – пластины, т.е., фотостимулированной люминесценции (ФСЛ). Испускаемые кванты света могут быть зарегистрированы различными методами, при этом интенсивность фотостимулированной люминесценции пропорциональна дозе электронного облучения пластины. Полученные профили распределения трития по образцу могут быть использованы для расчета коэффициента диффузии водорода в исследуемом материале. Полученные в работах [17, 18] радио-

люминографическим методом коэффициенты диффузии водорода в сплаве циркония и стали 316L хорошо согласуются с представленными в литературе данными, что свидетельствует о применимости метода радиолюминографии для определения закономерностей взаимодействия трития с материалами. Необходимо отметить, что для определения данных закономерностей использовались образцы, насыщенные тритием до высокой концентрации, поскольку цирконий и сталь 316L характеризуются высокой растворимостью водорода. В данной работе на примере вольфрама оценивается применимость радиолюминографического метода для исследования материалов с низкой растворимостью изотопов водорода и низким коэффициентом диффузии.

В данной работе в качестве чувствительного элемента для получения скрытого изображения распределения трития на поверхности образцов использовалась IP-пластина Fuji BAS-TR2025 (Fujifilm, Япония). На рис. 3 представлены радиолюминограммы лицевых поверхностей исследуемых образцов вольфрама. Области с более интенсивным свечением соответствуют участкам с более высокой концентрацией трития, поскольку именно эти области были подвержены облучению электронами, в то время как остальная поверхность образцов во время облучения электронами была закрыта специальной защитной маской. Для количественной оценки трития в вольфраме использовались стандартные образцы, содержащие известное количество трития. Сравнение со стандартными образцами позволяет определить относительные концентрации трития в исследуемом вольфраме. Полученные радиолюминограммы демонстрируют сравнительно высокие уровни трития на поверхности облученного вольфрама. Это может объясняться тем, что тритий, скорее всего, захвачен в углеродной пленке, осажденной в ходе облучения электронами. Углерод характеризуется значительным удержанием трития, в связи с этим поверхность образцов перед выдержкой на IP-пластине обрабатывается спиртом для удаления углеродной пленки. Повышенная концентрация трития на лицевой и обратной поверхностях образца приводит к засветке фотопластины при получении изображения среза образца. При анализе профилей из рассмотрения были исключены участки толщиной 0.05–0.1 мм с каждого края образца, так как в этой области существенное влияние оказывает излучение трития с боковых поверхностей образца.

На рис. 4 представлена схема получения профиля распределения трития в продольных и поперечных срезах на примере образца, облученного наибольшим потоком электронов. В связи с

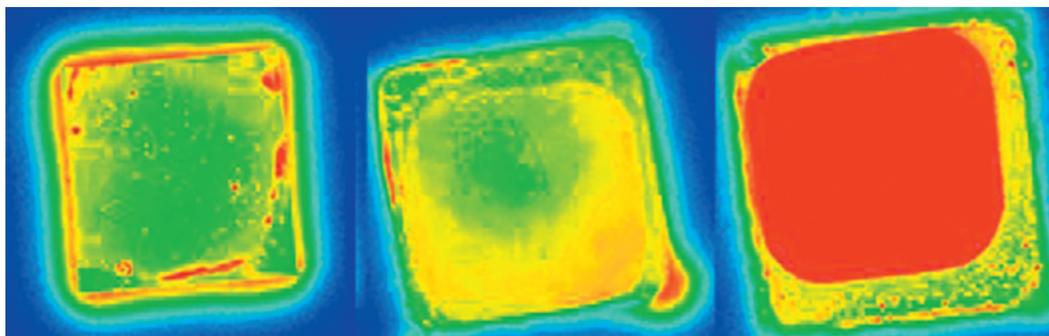


Рис. 3. Радиолюминограммы образцов вольфрама. Слева направо: необлученный (W1), облученный $7 \cdot 10^{21} \text{ e/m}^2$ (W4) и облученный $7 \cdot 10^{22} \text{ e/m}^2$ (W7).

тем, что значения интенсивности получаются в относительных единицах, то корректно сравнивать только изображения, полученные на одной пластине после одновременной выдержки нескольких образцов одинаковое время. Для получения продольного профиля делался срез образца вдоль его длины (срез А–А на рис. 4). Толщина среза составляла 1 мм, длина 10 мм. Распределение концентрации трития в продольном срезе вдоль длины образца (10 мм) представлено на рис. 4б. Низкая концентрация трития в начале профиля соответствует области образца, закрытой от облучения защитной маской. Плато на профиле концентрации указывает на равномерное распределение трития по длине зоны облучения. Далее из верхней, центральной и нижней областей продольного среза отсекались три участка (рис. 4в). Полученные профили концентрации в указанных трех поперечных срезах (рис. 4г) представляют наибольший интерес, поскольку отражают распределение трития по толщине образца (1 мм). Профиль № 1 соответствует распределению в зоне, не содержащей индуцированные дефекты. Из рисунка 4 видно, что содержание трития в области, содержащей дефекты структуры (профили №№ 2 и 3), выше, чем в неповрежденной области (профиль № 1). Кроме этого следует отметить, что профиль распределения трития в области с дефектами характеризуется наклоном, убывающим от поверхности, обращенной к облучающему потоку, к обратной поверхности, что соответствует профилю распределения дефектов (рис. 2).

Чтобы оценить динамику изменения распределения трития во времени, насыщенные тритием срезы образцов хранились в течение двух лет при температуре жидкого азота для снижения скорости диффузии трития в образцах. Далее был проведен повторный анализ трития в поперечных и продольных срезах образцов радиолюминографическим методом, а также путем регистрации тормозного рентгеновского излучения. Второй метод основан на том, что потери энергии электрона, вызванные его торможением в кулоновском поле атома, преобразуются в кванты рентгеновского излучения. Глубина выхода тормозного рентгеновского излучения из металлов и сплавов значительно превышает глубину выхода бета-излучения (около 1 мкм) и составляет около 10–30 мкм, что позволяет оценить содержание и распределение трития не только на поверхности, но и в объеме материалов [19]. В данной работе для регистрации тормозного излучения образцы выдерживались в течение 17 ч на IP – пластине, покрытой защитным слоем полиэтиленовой пленки, выполняющим функцию барьера для бета-излучения (электронов, образующихся при распаде трития). Обработка скрытого изображения, полученного на IP-пластине, проводилась на приборах BAS-1800II (Fujifilm) с разрешением 50 мкм и Amersham Typhoon (GE Healthcare) с разрешением 10 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5 представлена зависимость средней удельной интенсивности фотостимулированной люминесценции (ФСЛ) для всего образца и средней удельной интенсивности в зоне, обращенной к облучающему потоку, от величины облучающей дозы электронов. Удельная интенсивность по всему образцу (на рис. 5 показана квадратными маркерами) рассчитывалась как отношение общей интенсивности ФСЛ, измеренной по всему образцу, к площади всего образца. Удельная интенсивность в зоне облучения (на рис. 5 показана круглыми маркерами) рассчитывалась как отношение интенсивности ФСЛ, измеренной в области облучения, к площади облученного участка. Из полученной зависимости следует, что с увеличением облучающей дозы электронов возрастает измеряемая интенсивность люминесценции (ФСЛ) и, соответственно, концентрация трития в вольфраме. Интенсивность люминесценции в зоне облучения для образца, облученного до дозы $7 \cdot 10^{21} \text{ e/m}^2$,

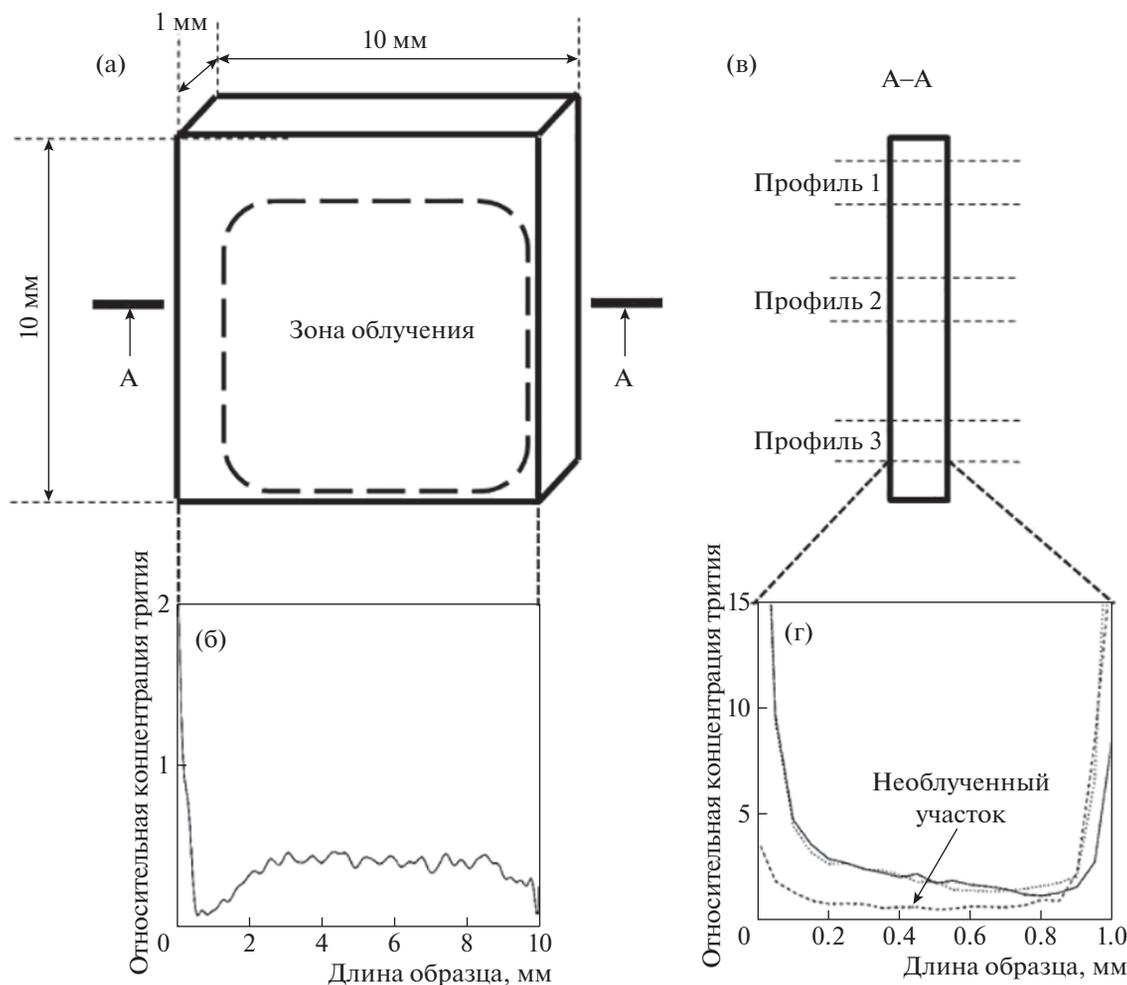


Рис. 4. Схемы получения продольных (а), (б) и поперечных (в), (г) профилей распределения трития в образце вольфрама, облученном до дозы $7 \cdot 10^{22} \text{ e/m}^2$.

отличается от интенсивности в необлученном образце вольфрама в ~ 2 раза. Отношение интенсивности ФСЛ в зоне облучения для образца, облученного до дозы $7 \cdot 10^{22} \text{ e/m}^2$, к интенсивности люминесценции для необлученного образца равно ~ 7 . Полученные результаты свидетельствуют о влиянии величины облучающей дозы электронов на удержание трития в образцах.

На рис. 6 представлены профили концентраций трития на поверхности продольных срезов образцов вольфрама, полученные радиолуминографическим методом. Анализ полученных профилей подтверждает вышеуказанные выводы: для облученного до наибольшей дозы ($7 \cdot 10^{22} \text{ e/m}^2$) образца характерна наибольшая концентрация трития. При этом низкая концентрация трития в начале профиля, как было отмечено выше, обусловлена отсутствием электронно-индуцированных дефектов в этой области. В зоне электронного облучения тритий распределен равномерно. Концентрация трития в образце, облученном

электронами до меньшей дозы, сопоставима с концентрацией трития в необлученном образце. Одинаково низкая концентрация трития в профилях распределения для облученного до наименьшей дозы ($7 \cdot 10^{21} \text{ e/m}^2$) образца и необлученного образца указывает на нижний предел обнаружения трития в условиях данного эксперимента.

На рис. 7 представлены профили распределения трития в поперечных срезах образцов вольфрама. Разные типы линий соответствуют разным поперечным срезам одного образца (пример получения поперечных срезов представлен на рис. 4). При этом для образца, облученного до наибольшей дозы, был также получен профиль распределения трития в необлученной области, то есть не содержащей электронно-индуцированных дефектов структуры (рис. 7в). Поперечные профили, полученные для каждого образца, практически совпадают, что свидетельствует об одинаковом распределении трития по толщине

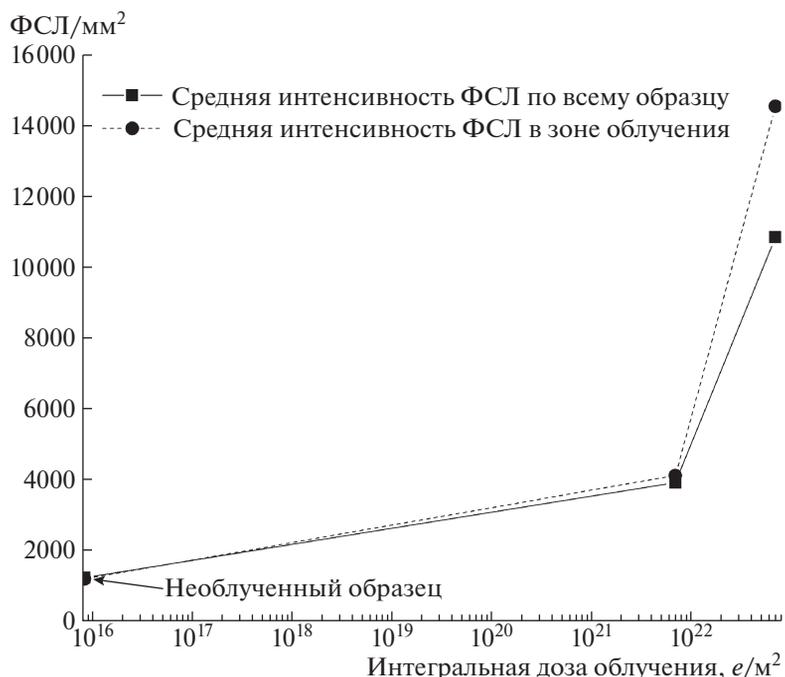


Рис. 5. Зависимость интенсивности фотостимулированной люминесценции от дозы облучения (2017 г.).

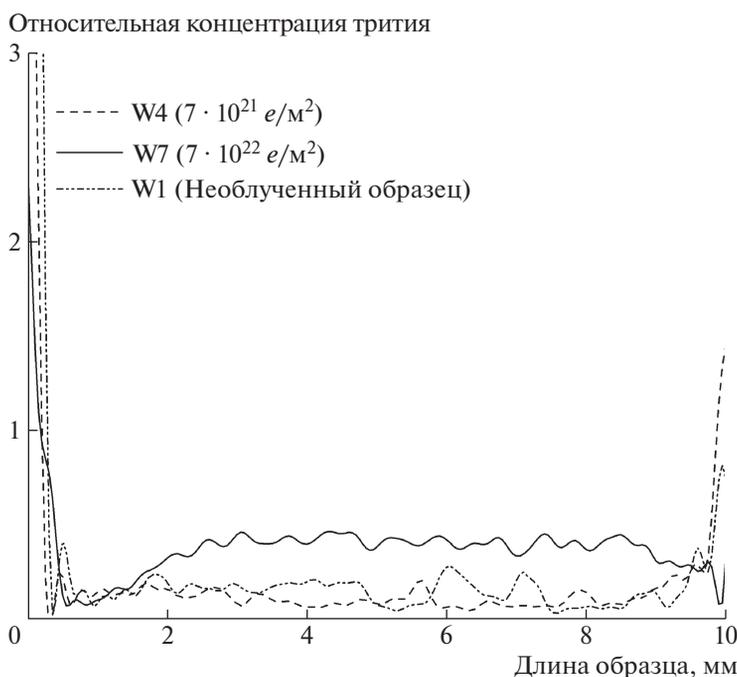


Рис. 6. Профили концентрации трития в продольных срезах образцов вольфрама (2017 г.).

образца независимо от координаты длины зоны облучения.

На рис. 8, объединяющем профили с рис. 7, представлено сравнение профилей распределе-

ния трития в центральной области образцов вольфрама (профиль № 2 на рис. 4в). Экспериментально полученные профили распределения трития аппроксимированы линейными зависимостями, которые представлены на рис. 8 сплошными ли-

ниями, позволяющими оценить распределение трития по толщине образца.

Для слабооблученного образца невозможно установить влияние дефектов на захват трития. Профиль образца, облученного до меньшей интегральной дозы (W4), совпадает с профилем распределения трития в необлученном образце. При этом распределение трития по всей толщине этих образцов является равномерным, то есть характеризуется постоянной концентрацией в пределах погрешности, поскольку разница между концентрациями в начале и конце профиля является незначительной относительно этой же разницы для профиля, облученного до наибольшей дозы. Профиль распределения трития в образце, облученном до наибольшей интегральной дозы, характеризуется снижением концентрации трития по толщине образца, что отражается в наибольшей величине наклона данного профиля (рис. 8).

Сравнение представленных на рис. 6, 7 и 8 профилей распределения трития для трех образцов показывает, что образец облученный до интегральной дозы $7 \cdot 10^{21} \text{ e}/\text{m}^2$, и необлученный образец характеризуются равным и относительно равномерным распределением концентраций по длине и толщине образца. При этом для указанных образцов уровень концентрации трития в продольном и поперечном срезях значительно ниже, чем для образца, облученного до интегральной дозы $7 \cdot 10^{22} \text{ e}/\text{m}^2$. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при повреждающей дозе меньше $4 \cdot 10^{-4}$ сна метод радиолуминографии не позволяет оценить распределение трития в дефектах в условиях данного эксперимента. Данный предел чувствительности обусловлен характеристиками сканера, используемого в данной работе для проявления изображения с IP-пластин, а также свойствами самой IP-пластины. Стоит отметить, что используемые в экспериментальной работе сканер и IP-пластины на сегодняшний день обладают максимальным разрешением. В связи с этим, можно утверждать, что значение $1 \cdot 10^{-4}$ сна является нижним пределом чувствительности метода радиолуминографии ввиду отсутствия более широких технических возможностей проведения радиолуминографического анализа.

Как было отмечено в описании экспериментальной методики, образцы вольфрама после длительного хранения (2017–2019 гг.) были повторно исследованы с применением метода радиолуминографии и регистрации тормозного рентгеновского излучения. На рис. 9 представлены профили концентрации трития в поперечных срезях образцов вольфрама, полученные радиолуминографическим методом. В необлученном образце и образце, облученном меньшим потоком электронов, тритий распределен сравнительно

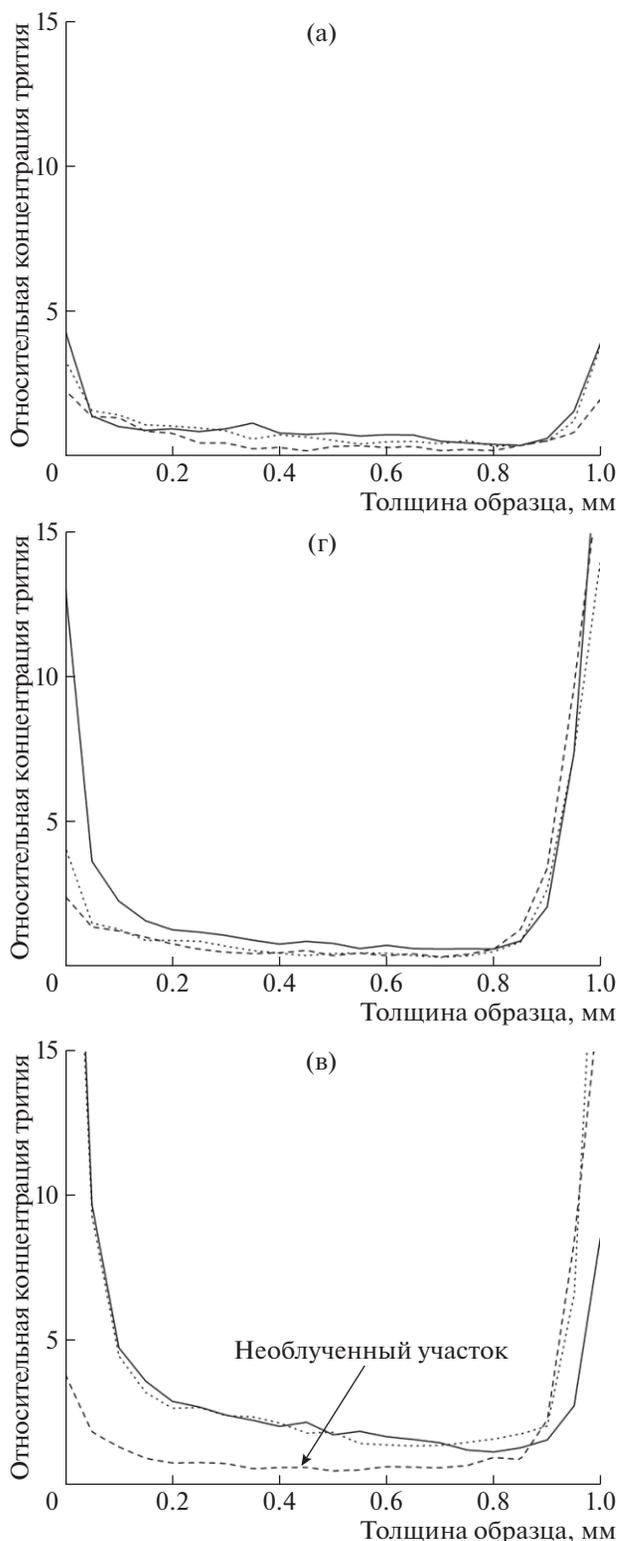


Рис. 7. Профили концентрации трития в поперечных срезях образцов вольфрама (2017 г.): (а) необлученный образец вольфрама (W1); (б) образец, облученный до интегральной дозы $7 \cdot 10^{21} \text{ e}/\text{m}^2$ (W4); (в) образец, облученный до интегральной дозы $7 \cdot 10^{22} \text{ e}/\text{m}^2$ (W7).

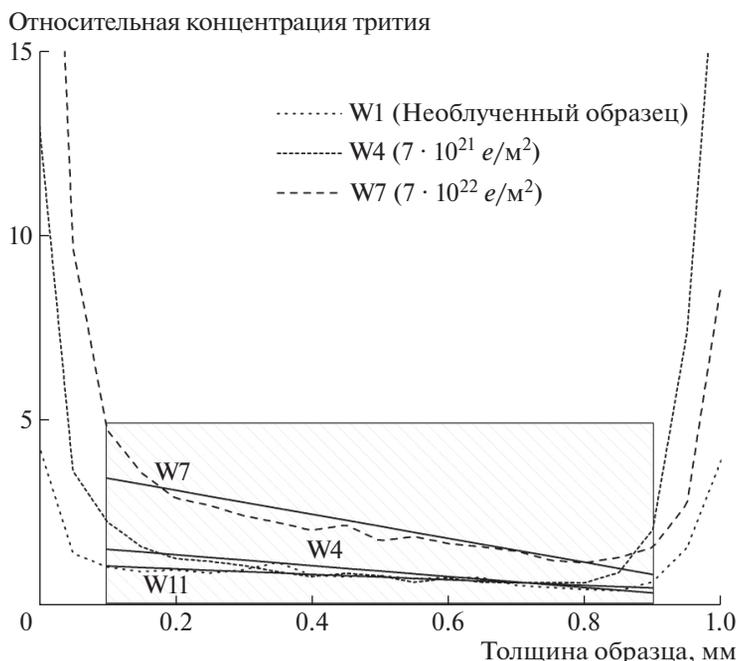


Рис. 8. Сравнение профилей концентрации для образцов вольфрама сразу после насыщения (2017 г.).

но равномерно, средняя концентрация по толщине не превышает 0.005 относительных единиц. На профилях для облученной части образца, облученного до интегральной дозы $7 \cdot 10^{22} \text{ e/м}^2$, наблюдается наличие пика (экстремума). Сравнение концентраций трития в облученном и необлученных образцах после насыщения и после длительного хранения представлено в табл. 1.

Уменьшение концентрации трития в приповерхностных областях облученного образца может быть связано с изотопным обменом между содержащимся в образце тритием и водородом, присутствующим в атмосфере, в ходе длительного хранения.

Анализ распределения трития в образцах вольфрама проводился также с применением метода регистрации тормозного рентгеновского излучения. На рис. 10 представлены профили распределения трития в поперечных срезах образцов, по-

лученные после длительного хранения. Также как и при анализе 2017 г. для каждого образца профиль распределения трития по сечению был снят в трех–четырёх местах для набора статистики, что отражено на рис. 10 линиями разного типа. Относительные концентрации трития в облученных и необлученном образцах практически равны. В целом, картина распределения трития в образцах не соответствует результатам, которые были получены радиолюминографическим методом. Это может быть связано с особенностями используемых методик исследования. Регистрация тормозного излучения позволяет оценить количество трития в большей толщине материала, чем метод радиолюминографии и нивелировать влияние пленок, образующихся на поверхности материала. Тот факт, что IP-пластина детектирует рентгеновское излучение, проникающее с большей глубины, чем бета-излучение, приводит к тому, что полученное изображение распределения трития является несколько геометрически искаженным и более сглаженным.

ВЫВОДЫ

Исследование распределения трития в необлученных и облученных электронами образцах вольфрама проводилось методом радиолюминографии непосредственно после насыщения образцов тритием, а также после длительной выдержки на атмосфере. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

Таблица 1. Сравнение отношений концентрации трития в необлученном и облученных образцах после насыщения и после длительного хранения

Отношение концентраций трития в центральной области профиля	2017 год (после насыщения)	2019 год
W7/W1	3.3	2.5
W4/W1	1.0	0.5
W7/W4	3.3	5.6

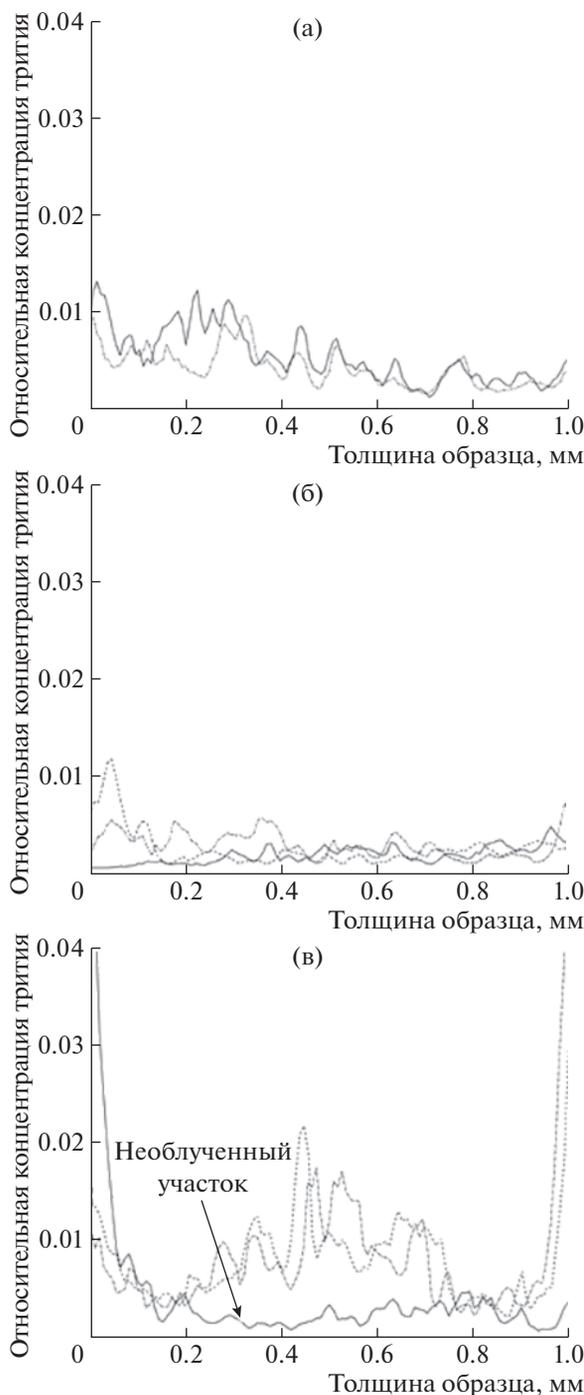


Рис. 9. Профили концентрации трития в поперечных срезах образцов вольфрама (2019 г.): (а) необлученный образец вольфрама (W1); (б) образец, облученный до интегральной дозы $7 \cdot 10^{21} \text{ e/m}^2$ (W4); (в) образец, облученный до интегральной дозы $7 \cdot 10^{22} \text{ e/m}^2$ (W7).

- Продемонстрирована принципиальная возможность применения метода радиолуминографии для анализа распределения малых количеств трития в электронно-индуцированных дефектах вольфрама. Интенсивность люминесценции в зоне облучения для образца, облученного до дозы

$7 \cdot 10^{21} \text{ e/m}^2$, отличается от интенсивности в необлученном образце вольфрама в ~ 2 раза.

- В соответствии с актуальными на сегодняшний день техническими возможностями радиолуминографического анализа установлена чувствительность данного метода к величине элек-

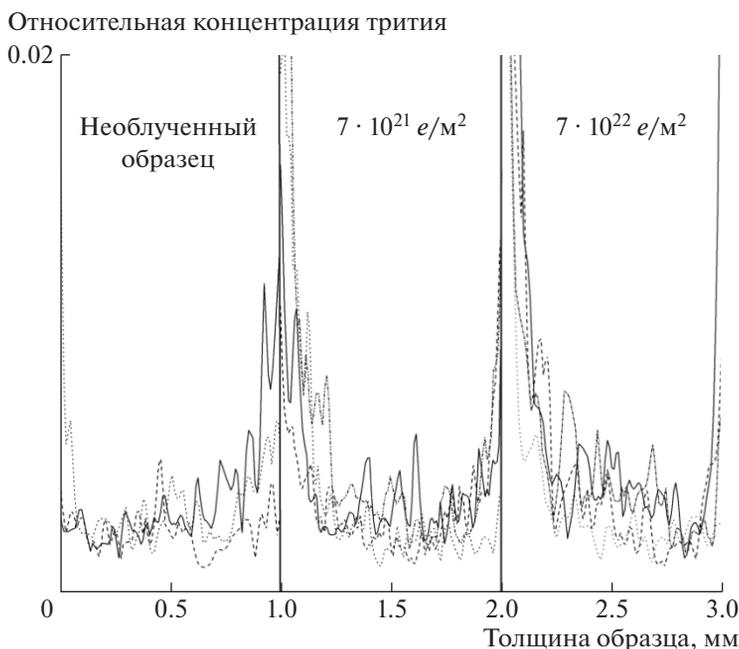


Рис. 10. Профили концентраций трития в поперечных срезах образцов вольфрама, полученные путем регистрации тормозного излучения (2019 г.).

тронно-индуцированных дефектов с точки зрения обнаружения накопленного в них трития. В условиях данной экспериментальной работы значение $1 \cdot 10^{-4}$ сна может быть установлено в качестве предела чувствительности метода радиолюминографии для обнаружения трития в дефектах.

• На основании снижения концентрации трития в приповерхностных областях после длительного хранения образцов, было сделано предположение о возможном влиянии изотопного обмена с водородом, присутствующим в атмосфере, на изменение распределения трития в вольфраме.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (Приказ №2948 от 18.11.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Shimada M. et al. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 337–339. P. 808–815.
2. You J.H. et al. // Fusion Eng. Des. B. 2016. V. 109–111. Part B. P. 1598–1603.
3. Papadakis D., Dellis S., Mergia K., Chatzikos V., Terentyev D., et al. The // Fusion Eng. Des. 2021. V. 168. P.112608.
4. Bobyr N.P. et al. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 1122–1124.
5. Hirai T. et al. // Nucl. Mater. Energy. 2016. V. 9. P. 616–622.
6. Alimov V.Kh., Torikai Y., et al. // Fusion Eng. Des. 2021. V. 162. P. 112100.
7. Hatano Y. et al. // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. P. S114–S119.
8. Rogozhkin S.V. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2021. V. 486. P. 1–10.
9. Khripunov B.I. et al. // Phys. Proc. 2015. V. 71. P. 63–67.
10. Nobuta Y. et al. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 993–996.
11. Torikai Y. et al. // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. P. S1121–S1124.
12. Mednikov A.A., Bobyr N.P., et al. // Proc. 11th Int. School of Young Scientists and Specialists Named by A.A. Kurdjumov. 2016. P. 318–324 (in Russian).
13. Бобырь Н.П. и др. Устройство для насыщения образцов материалов изотопами водорода [Device for Saturation of Material Samples with Hydrogen Isotopes]. Патент РФ № 171739. 2017.
14. Otsuka T., Tanabe T. // Mater. Trans. 2017. V. 58 (10). P. 1364–1372.
15. Ohuchi-Yoshida H. et al. // Fusion Eng. Des. 2012. V. 87 (5–6). P. 423–426.
16. Плявинь И.К., Тале А.К. // Автометрия. 2001. № 6. С. 3–23. https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/2001/6/3-23.pdf.
17. Иванов Б.В. // Усп. хим. хим. технол. 2013. Т. 7. № 6. С. 131–135.
18. Лесина И.Г., Семенов А.А. и др. // ВАНТ. Материаловедение и новые материалы. 2019. Т. 4. № 100. С. 81–90.
19. Mao L. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2011. V. 269 (2). P. 105–110.

Application of the Radioluminography Method for the Analysis of the Distribution of Small Amounts of Tritium in Electronic-Induced Defects in Perspective Materials for Fusion Reactors

N. P. Bobyr^{1, 2}, T. A. Anfimova^{1, 3, *}, B. V. Ivanov¹, A. S. Anikin², I. G. Lesina², A. A. Semenov²,
N. E. Zairova², A. S. Kryukova², A. N. Bukin^{2, 3}, and A. V. Lizunov²

¹National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia

²Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, 123098 Russia

³Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047 Russia

*e-mail: Anfimova_TA@nrcki.ru

Received May 30, 2022; revised June 3, 2022; accepted June 21, 2022

Abstract—The relevance of research of the interaction of hydrogen isotopes with the fusion reactor materials is primarily due to issues of economics and safety. The study of the influence of defects in materials on the accumulation of hydrogen has a special importance. In this work the radioluminography technique was used to analyze the distribution of tritium in electron-induced tungsten defects. The sensitivity of this technique to the magnitude of electron-induced defects from the point of view of detecting the accumulated tritium is established. The repeated analysis of tungsten samples was performed to assess the change in the distribution of tritium after long-term storage in the atmosphere, because this method allows to analyze repeatedly.

Keywords: tritium, radioluminography, photostimulated luminescence, tritium distribution, tungsten, electronic-induced defects