

УДК 533.9.082.5

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ АБЛЯЦИЯ И ДЕСОРБЦИЯ
ВОЛЬФРАМОВЫХ ПЛЕНОК, НАСЫЩЕННЫХ ДЕЙТЕРИЕМ© 2024 г. Е. В. Смирнова^{1,3,*}, О. С. Медведев^{1,2}, А. Г. Раздобарин^{1,3}, Д. И. Елец^{1,2,3},
Л. А. Снигирев^{1,3}, Я. Р. Шубин^{1,3}

Представлено академиком РАН Н.Н. Розановым 14.12.2023 г.

Поступило 14.12.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принято к публикации 07.02.2024 г.

Сравниваются методы лазерно-индуцированной десорбции (ЛИД) и абляции (ЛИА) для оценки возможности абсолютного количественного анализа содержания изотопов водорода в материалах первой стенки термоядерных реакторов. Пленки вольфрама, насыщенные дейтерием, толщиной 300–400 нм на кремниевой подложке использовались как модельные образцы. Для реализации ЛИД образцы облучались лазерными импульсами с длительностью 200 мкс и плотностью энергии 50–150 Дж/см², для ЛИА – 12 нс и 5–15 Дж/см². Регистрация остаточных газов проводилась методом квадрупольной масс-спектрометрии. В режиме ЛИД проведено компьютерное моделирование нагрева лазерным импульсом. Результаты моделирования и эксперимента показали, что нагрева при плотности энергии 100–150 Дж/см² достаточно для дегазации пленок вольфрама исследуемой толщины. Сравнение количества десорбированного дейтерия в режиме ЛИД (150 Дж/см²) и ЛИА (15 Дж/см²) показывает, что оно идентичное в пределах погрешности измерения и равно $4.15 \pm 0.15 \cdot 10^{14}$ см⁻².

Ключевые слова: лазерно-индуцированная абляция, лазерно-индуцированная десорбция, моделирование, первая стенка, токамак, диагностика накопления трития

DOI: 10.31857/S2686740024020043, EDN: KHRXIS

В устройстве термоядерных установок типа токамак, таких как ITER, важная роль отводится контролю накопления термоядерного топлива в компонентах первой стенки и переосаждениях, образующихся при длительных импульсах плазменного разряда [1]. Взаимодействие плазмы с внутренней облицовкой вакуумной камеры и накопление в ней термоядерного топлива являются одними из ключевых факторов, определяющих выбор обращенных к плазме материалов для термоядерных устройств нового поколения [2]. На данный

момент в качестве материала дивертора и первой стенки ITER предполагается использовать вольфрам благодаря уникальным характеристикам, таким как высокая температура плавления, хорошая теплопроводность, высокая устойчивость к термическим нагрузкам. Кроме того, у вольфрама низкий уровень накопления радиоактивного трития, что также является преимуществом для его использования как конструкционного материала [3]. Однако контроль накопления термоядерного топлива в переосаждениях вольфрама является важным вопросом как с точки зрения управления плазмой, так и безопасности, так как содержание изотопов водорода в переосажденных слоях может в 10–15 раз превышать концентрацию в объемном материале [4].

Среди механизмов накопления изотопов водорода в первой стенке термоядерных реакторов

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: evsmirnova@mail.ioffe.ru

выделяют кратковременную адсорбцию с последующим газовыделением, глубокую имплантацию (захват изотопов водорода на радиационных дефектах, в примесях, дислокациях и междоузлиях кристаллической решетки) и совместное осаждение с материалами, распыленными при контакте плазмы с поверхностью облицовки [5]. Причем переосаждение приводит к непрерывному накоплению изотопов водорода без точки насыщения, поэтому именно пленки требуют особого внимания при проведении диагностики накопления радиоактивного трития.

Одними из наиболее точных и зарекомендовавших себя методов получения данных об абсолютном содержании изотопов водорода являются метод термодесорбционной спектроскопии [6] и метод ядерных реакций [7]. Однако оба этих метода могут быть реализованы только после вскрытия вакуумной камеры — крайне нерегулярной процедуры даже в действующих токамаках, а в случае использования трития в качестве рабочего газа сопряженной с огромными временными и финансовыми затратами. Другой проблемой этих методов является невозможность оперативной оценки содержания дейтерия и трития, захваченных в ходе импульсов плазменного разряда. Отсутствие возможности *in-situ* контроля нестабильности плазмы, вызывающей нагрев первой стенки токамака и десорбцию трития или дейтерия в плазму, может приводить к изменению количественного соотношения между компонентами топлива и неконтролируемой термоядерной реакции [8]. Кроме того, при извлечении исследуемых объектов и контакте с атмосферным воздухом будет происходить изотопный обмен, что может существенно повлиять на количественный анализ [9, 10].

Последние 10–15 лет активно развиваются дистанционные лазерные методы оценки количества изотопов водорода в элементах первой стенки [1, 11–13]. К этим методам относятся лазерно-индуцированная десорбция (ЛИД) и лазерно-индуцированная абляция (ЛИА) в сочетании с масс-спектрометрией и оптической спектроскопией. Эти методы могут применяться между импульсами плазменных разрядов без необходимости вскрытия вакуумного объема термоядерного реактора.

Эффективность детектирования изотопов водорода методом ЛИД совместно с квадрупольным масс-спектрометром (ЛИД-КМС) составляет от 60 до 90% по сравнению с измерениями на таких же образцах термодесорбционной спектроскопией (ТДС) и предполагается как диагностика накопления трития на ITER [11, 14]. Данный метод уже имеет доказанную эффективность для слоев Ве до 10 мкм, однако он плохо применим для объемных материалов и мало изучен для переосажденных слоев вольфрама.

ЛИА является альтернативным методом дистанционной диагностики, который дает возможность профилирования содержания изотопов водорода по глубине за счет послойного удаления материала [12], а также проведения спектроскопии лазерной искры [13, 15–17]. Несмотря на преимущества ЛИА, одним из основных недостатков применения является удаление материала мишени в различной форме: атомы, молекулы, кластеры, капли микронного размера и твердые частицы [18]. При этом остается неясным, какая часть водорода, содержащаяся в удаленном материале, может быть зарегистрирована методом масс-спектрометрии. Сравнение измерений содержания дейтерия в пленках алюминия методом ЛИА с ТДС и ЛИД было проведено в работе [19], где было показано, что ЛИА позволяет выделить до 85% дейтерия от значения, полученного методом ТДС. Несмотря на близкое значение зарегистрированного дейтерия методом ЛИА, количественный результат, полученный методом ЛИД с длительностью импульса 10 нс, у авторов составляет 9% [19], в сравнении с 60–90% зарегистрированными ЛИД-КМС в работе [11] при длительностях лазерного импульса 3–5 мс. Существующие на данный момент противоречивые результаты о количественном содержании изотопов водорода в переосажденных слоях лазерными методами ЛИА и ЛИД требуют дополнительных исследований для оценки возможности их применения для мониторинга накопления термоядерного топлива, в том числе для переосаждений вольфрама.

В данной работе приводятся результаты количественного сравнения измерений содержания дейтерия методами ЛИА и ЛИД в случае модельных образцов пленок вольфрама,

осажденных на кремниевой подложке. Для осуществления ЛИД использовался режим свободной генерации лазера. Для данного процесса было проведено компьютерное моделирование нагрева образца лазерным излучением. ЛИА осуществлялась на этом же стенде, но в режиме модуляции добротности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБРАЗЦЫ

Для проведения ЛИД и ЛИА использовался импульсный лазер Nd:YAG Solar LQ529 (Solar LS, Беларусь) с длиной волны излучения 1064 нм, частотой следования импульсов 10 Гц и возможностью работы в режимах модуляции добротности и свободной генерации с длительностью импульса 12 нс и 200 мкс соответственно. Энергия в импульсе составляет 450 мДж. Профиль лазерного излучения имеет близкое к равномерному распределение энергии в режиме свободной генерации и гауссово распределение для режима модуляции добротности с пиковой плотностью энергии на поверхности образца от 1 Дж/см² до 150 Дж/см², которая изменяется аттенуатором. Фокусирование лазерного излучения на образце осуществляется двухлинзовой телескопической системой. Все оптические элементы имеют просветляющее покрытие на 1064 нм.

Вакуумный объем представляет собой цилиндр диаметром 250 мм с общим объемом 70 л. Перед началом эксперимента камера откачивалась до рабочего давления $7 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ Па турбомолекулярным насосом Turbovac 90i (Leybold, Германия) со скоростью откачки 90 л/с. Анализ остаточных газов производится с помощью квадрупольного масс-спектрометра Extorr XT300M (Extorr Inc., США). В экспериментальном стенде для ЛИА и ЛИД, КМС имеет собственную дифференциальную откачку вакуумным постом HiCube 80 ECO (Pfeiffer Vacuum, Германия) и присоединяется к общему вакуумному объему через апертуру диаметром 1 мм для обеспечения давления в объеме КМС в пределах 1 – $2 \cdot 10^{-2}$ Па во время лазерных импульсов.

В качестве образцов для исследования ЛИА и ЛИД использовали пленку вольфрама толщиной 300–400 нм, насыщенную дейтерием, на подложке кремния толщиной 300 мкм.

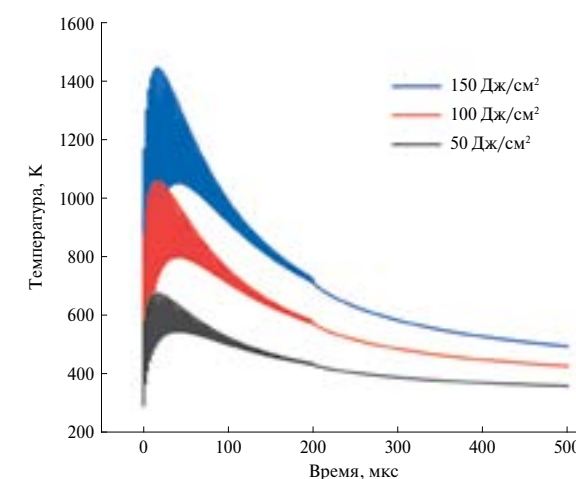


Рис. 1. График динамики температуры в центре воздействия лазерного излучения на поверхности образца при воздействии лазерным импульсом в режиме свободной генерации.

Напыление пленки W осуществлялось из мишени марки ВЧ-1 методом импульсного лазерного осаждения в атмосфере дейтерия (99.92%) при рабочем давлении 30 Па.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В работах [11, 20] для ЛИД используется лазерное излучение с длительностью импульса 1.5–5 мс и с равномерным распределением интенсивности по лазерному пятну и во времени. В нашем случае в режиме свободной генерации лазерный импульс общей длительностью порядка 200 мкс, задний фронт волны которого затухал к концу импульса. Импульс состоял из пиков с полушириной 400 нс. Для оценки требуемой плотности энергии для достижения температуры десорбции дейтерия из пленки вольфрама в первом приближении импульс свободной генерации описывался набором функций Гаусса, интенсивность которых спадала экспоненциально, согласно временным характеристикам импульса, измеренным с помощью осциллографа. Длительность единичного импульса составляла 400 нс, период — 2700 нс, суммарно 100 импульсов. Моделирование лазерного нагрева производилось в программном пакете COMSOL Multiphysics 6.1. В качестве образца для моделирования процесса ЛИД использовали тонкий слой пленки вольфрама (W) толщиной 1 мкм, который находился на кремниевой подложке с радиусом 5 мм и

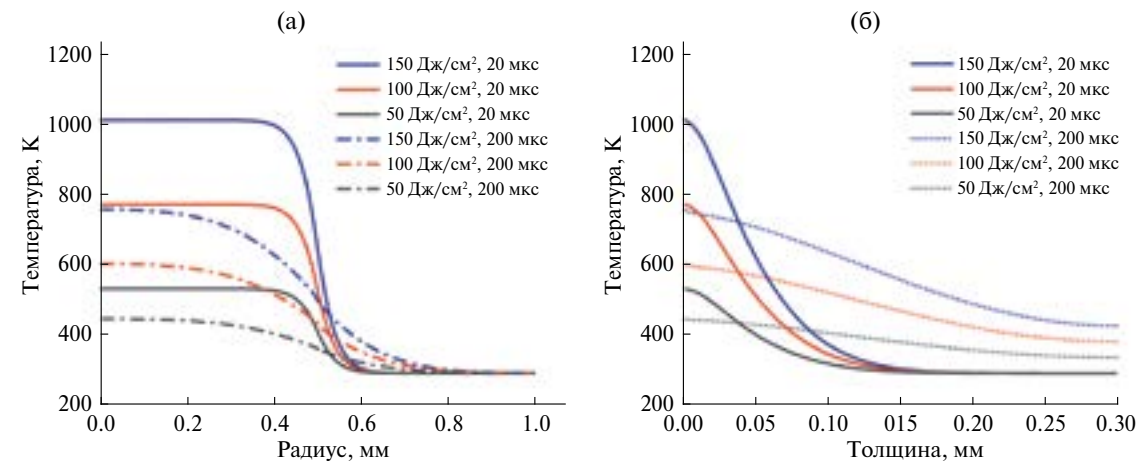


Рис. 2. Распределение температуры по поверхности (а) и толщине (б) образца при достижении максимальной температуры на поверхности и сразу после окончания воздействия лазерного импульса в режиме свободной генерации.

толщиной 300 мкм. В качестве источника излучения использовали лазер с длиной волны излучения 1064 нм (длина волны учитывалась в поглощательной способности W). В поперечном сечении пучок был задан равномерным распределением интенсивности шириной 1 мм, что соответствует реально измеренному размеру пятна на поверхности образца.

Для исследования зависимости температурного распределения в объеме образца использовали три плотности энергии лазерного излучения 50 Дж/см², 100 Дж/см² и 150 Дж/см².

График изменения температуры от времени в центре лазерного пятна на поверхности образца во время импульса представлен на рис. 1. Согласно работам [4, 21], температура, при которой активно начинается десорбция дейтерия из пленок вольфрама, составляет 450–500 К, а большая часть дейтерия выделяется из пленок вольфрама до 750–800 К, следовательно, пленку вольфрама необходимо прогреть на всю глубину до данной температуры. Пунктирной линией на рис. 1 обозначена температура 800 К. Максимальная температура в центре пятна воздействия в режиме свободной генерации достигается после 20–50 мкс от начала воздействия лазерного импульса и по результатам моделирования составляет 540 К, 800 К и 1050 К (оценка снизу) для плотностей энергии 50 Дж/см², 100 Дж/см² и 150 Дж/см² соответственно. Из результатов моделирования следует, что при плотности энергии 50 Дж/см², если и будет, то скорее всего незначительная десорбция дейтерия. При плотностях энергий 100 и 150 Дж/см² должна

наблюдаться полная десорбция дейтерия из вольфрамовых осадений.

На рис. 2а приведены графики температуры на поверхности образца для 3 плотностей энергии в зависимости от точки удаления от центра лазерного пятна в момент максимальной температуры (сплошные линии) и в конце импульса свободной генерации (пунктирные линии). На рис. 2б представлены графики распределения температуры по глубине образца в те же моменты времени.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что плотности энергии 50 Дж/см² заведомо недостаточно для десорбции дейтерия из пленок вольфрама, но температура достигает значений начала десорбции. В случае 100 Дж/см² температура находится на ~50–100° К ниже температуры десорбции дейтерия из всех ловушек и, по-видимому, данной плотности энергии будет недостаточно для полной десорбции. В случае 150 Дж/см² максимальная температура пленки достигает заведомо больших температур, которых будет достаточно для десорбции изотопов водорода из пленок вольфрама толщиной 1 мкм. Если же смотреть на глубины прогрева импульсом свободной генерации, то можно сказать, что во всех трех случаях пленки толщиной 1 мкм имеют однородную температуру по глубине.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лазерно-индуцированная десорбция

Согласно проведенному моделированию в эксперименте ЛИД также использовались три

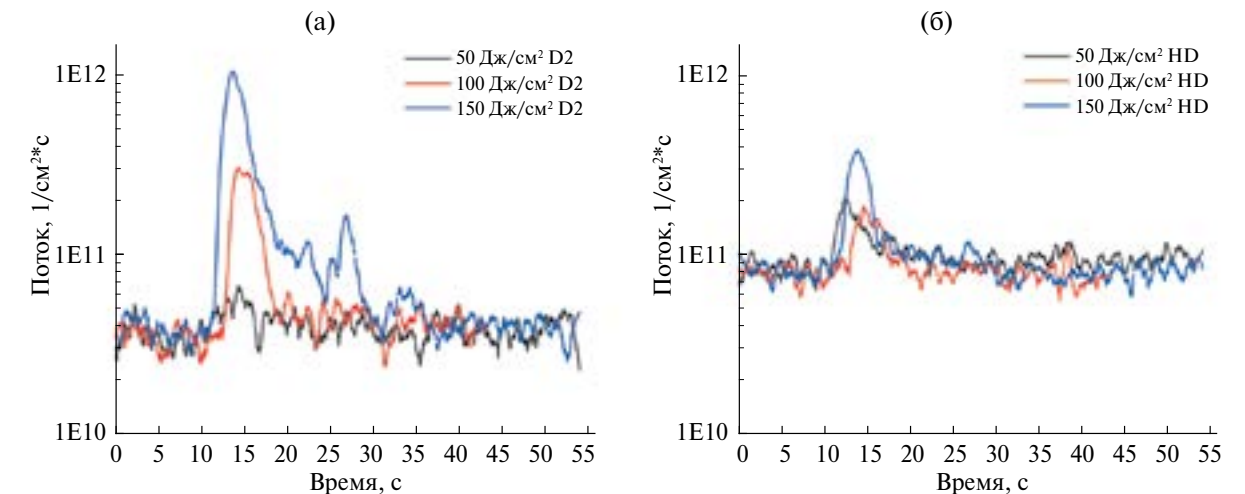


Рис. 3. Поток 4-й массы (а) и 3-й массы (б) при облучении в режиме свободной генерации с плотностями энергии 50, 100 и 150 Дж/см².

плотности энергии 50, 100 и 150 Дж/см². Оптическая система лазера не позволяет осуществить одиночный импульс в режиме свободной генерации. В связи с этим образец облучался в течение 1 мин с частотой следования импульсов 10 Гц. На рис. 3 представлены потоки молекул 4-й (а) и 3-й (б) масс. Абсолютные значения потоков вычислялись по калиброванной течи дейтерия с фиксированным потоком $1 \cdot 10^{-6}$ Па·м³/с. Представленные данные усреднялись по 50 точкам с помощью фильтра Савицкого–Голея (Savitzky–Golay). Черная кривая соответствует плотности энергии 50 Дж/см², и в случае 4-й массы повышение потока с началом воздействия — слабо заметно в сравнении с фоновым уровнем сигнала. В случае 3-й массы возрастание сигнала отчетливо наблюдается, что говорит о десорбции дейтерия в составе молекул HD. Для плотности энергии 100 Дж/см² пик 4-й массы становится явно выраженным, как и в случае 3-й массы. Несмотря на то что облучение длилось 1 мин, длительности пиков десорбции 4-й и 3-й масс составляет 5–6 с. Синие кривые соответствуют плотности энергии 150 Дж/см². Максимальный уровень потока 4-й массы при плотности энергии 150 Дж/см² превышает в 3 раза максимальный уровень при 100 Дж/см². Стоит отметить, что длительность основного пика десорбции составляет 8–10 с, но далее наблюдается затяжной спадающий фронт и несколько пиков десорбции, что, вероятнее всего, связано с постепенным нагревом близлежащей пленки вольфрама, которое

вносит не более 15% в общее содержание зарегистрированного дейтерия.

На рис. 4 представлены результаты измерения поверхностной плотности атомов дейтерия методом ЛИД–КМС в зависимости от плотности энергии. Интегральная поверхностная плотность вычислялась как разность между интегралом, включающим пик десорбируемых молекул D₂ и HD, и интегралом фонового уровня сигнала за один и тот же временной промежуток. Полученные данные нормировались на площадь лазерного пятна на образце, измеренного по микрофотографиям. Исходя из данных по моделированию нагрева в режиме свободной генерации результат, полученный экспериментально, подтверждает выводы о том, что температура пленки при плотности 50 Дж/см² только достигает температуры начала десорбции дейтерия из пленки. При плотности 100 Дж/см² максимальная температура превосходит температуру начала десорбции на 200–250 К, однако является недостаточной для полной десорбции дейтерия. И в последнем случае при 150 Дж/см² наблюдается максимальный выход дейтерия, а также становится заметным выход дейтерия из окружающей области за счет латеральной диффузии тепла.

Лазерно-индуцированная абляция

Для осуществления лазерной абляции использовалась та же оптическая схема, но лазер работал в режиме модуляции добротности, при котором длительность импульса составляла 12 нс. Порог абляции вольфрама

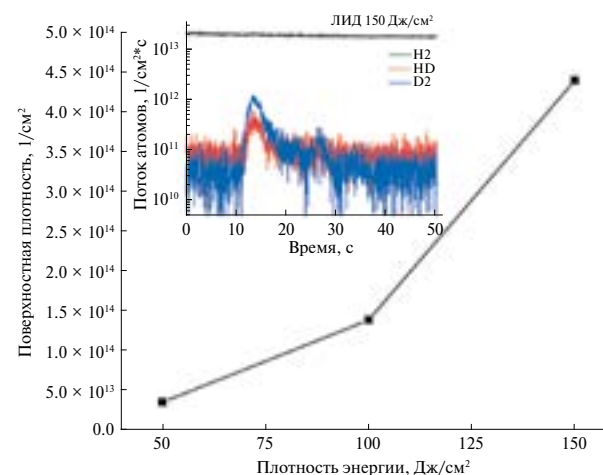


Рис. 4. Зависимость измеренной поверхностной плотности дейтерия от плотности энергии в режиме свободной генерации ($t_{\text{имп}} = 200$ мкс). Во вставке представлены временные зависимости для 2-й, 3-й и 4-й масс в случае плотности энергии 150 Дж/см².

для наносекундных импульсов составляет от 1 Дж/см² [22] до 3.5–4 Дж/см² [17]. В данной работе были выбраны плотности энергии 5, 10 и 15 Дж/см². Конфигурация лазера в режиме модуляции добротности позволяет осуществить единичный выстрел, поэтому регистрация сигнала КМС в режиме ЛИА осуществлялась для одиночных импульсов.

На рис. 5 представлена зависимость поверхностной плотности дейтерия от плотности энергии в случае ЛИА в том же масштабе, что и для ЛИД. В отличие от ЛИД, формы пиков десорбции 3-й и 4-й масс во всех трех случаях идентичны за исключением их амплитуд. Во-первых, стоит отметить, что для ЛИА разброс значений поверхностной плотности не такой значительный, как для ЛИД, и может быть связан с различной толщиной пленки вольфрама в разных частях образца. Во-вторых, все 3 значения близки к количеству дейтерия, зарегистрированному методом ЛИД при 150 Дж/см². Для двух методов количество атомов дейтерия, зарегистрированного при максимальной плотности энергии 150 Дж/см² для ЛИД и 15 Дж/см² для ЛИА, равно $4.0 \cdot 10^{14}$ см⁻² и $4.3 \cdot 10^{14}$ см⁻² соответственно.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты моделирования нагрева вольфрамовой пленки на кремневой подложке лазерным импульсом в режиме

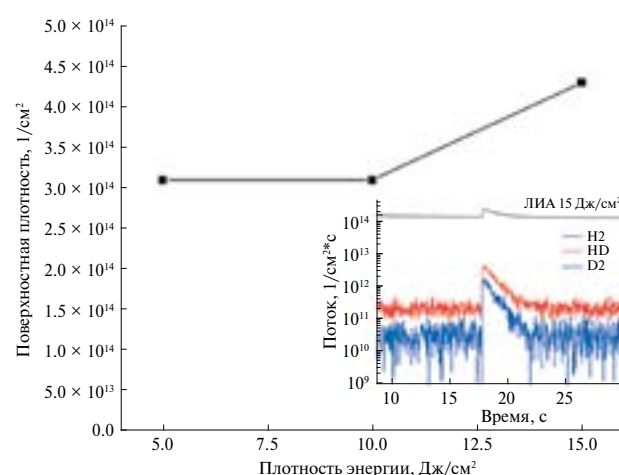


Рис. 5. Зависимость потока дейтерия от плотности энергии лазерного излучения в режиме модуляции добротности ($t_{\text{имп}} = 12$ нс). Во вставке представлены временные зависимости для 2-й, 3-й и 4-й масс в случае плотности энергии 15 Дж/см².

свободной генерации. Показано, что для длительности в режиме свободной генерации импульса 200 мкс плотности энергии 150 Дж/см² достаточно для нагрева пленки толщиной 1 мкм для полной десорбции дейтерия. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальным наблюдением десорбции дейтерия.

Проведено сравнение двух методов ЛИА и ЛИД по количеству регистрируемого дейтерия методом квадрупольной масс-спектрометрии. Показано, что разница при 150 Дж/см² для ЛИД и 15 Дж/см² для ЛИА составляет всего 6–7%. На следующем этапе работы планируется провести сравнение представленных результатов с данными, полученными классическими методами, такими как термодесорбционная спектроскопия и/или метод ядерных реакций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность заведующему лаборатории лазерной диагностики плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью ФТИ им. А.Ф. Иоффе Евгению Евгеньевичу Мухину за помощь в постановке эксперимента и МРЦ “Нанотехнологии” СПбГУ за проведение структурных исследований.

Статья написана по материалам одноименного доклада на 6-й школе-конференции молодых ученых ИОФ РАН “Прохоровские недели”, 2023 г.

Доклад был рекомендован к публикации по результатам экспертных оценок как один из лучших.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Моделирование лазерного воздействия выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание, тема №0034-2019-0001). Макетирование лазерно-индуцированной абляции и десорбции проведено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-12-00360). Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mukhin E.E. et al. In situ monitoring hydrogen isotope retention in ITER first wall // Nuclear Fusion. 2016. V. 56. № 3. P. 036017. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/3/036017>
2. Roth J. et al. Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2008. V. 50. № 10. P. 103001. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/50/10/103001>
3. Родина Н.Д., Морозова Н.Б., Введенский А.В. Кинетика выделения атомарного водорода и водородопроницаемость сплавов Ag-Pd в щелочной среде // Конденсированные среды и межфазные границы. 2020. Т. 22. № 2. С. 96–104. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2853>
4. Dellasega D. et al. Deuterium retention and surface modifications of nanocrystalline tungsten films exposed to high-flux plasma // J. Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 989–992. doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.025
5. Skinner C.H. Tritium retention and removal in Tokamaks // AIP Conference Proc. American Institute of Physics, 2009. V. 1095. № 1. P. 127–145. <https://doi.org/doi: 10.1063/1.3097310>
6. Krat S.A. et al. A setup for study of co-deposited films // J. Instrumentation. 2020. V. 15. № 1. P. P01011. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/01/P01011>
7. Rubel M. et al. Efficiency of fuel removal techniques tested on plasma-facing components from the TEXTOR tokamak // Fusion Engineering and Design. 2012. V. 87. № 5–6. P. 935–940. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.02.054>
8. Katayama K., Nishikawa M., Yamaguchi J. Isotope effect in hydrogen isotope exchange reaction on first wall

materials // J. Nuclear Science and Technology. 2002. V. 39. № 4. P. 371–376.

<https://doi.org/10.1080/18811248.2002.9715206>

9. Hodille E.A. et al. Retention and release of hydrogen isotopes in tungsten plasma-facing components: the role of grain boundaries and the native oxide layer from a joint experiment-simulation integrated approach // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. № 7. P. 076019. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6d24>
10. Moshkunov K.A. et al. Air exposure and sample storage time influence on hydrogen release from tungsten // J. Nuclear Materials. 2010. V. 404. № 3. P. 174–177. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.07.011>
11. Zlobinski M. et al. Laser induced desorption as tritium retention diagnostic method in ITER // Fusion Engineering and Design. 2011. V. 86. № 6–8. P. 1332–1335. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.02.030>
12. Paris P. et al. Comparison of LIBS results on ITER-relevant samples obtained by nanosecond and picosecond lasers // Nuclear Materials and Energy. 2019. V. 18. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.11.018>
13. Maddaluno G. et al. Detection by LIBS of the deuterium retained in the FTU toroidal limiter // Nuclear Materials and Energy. 2019. V. 18. P. 208–211. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.12.029>
14. Gierse N. et al. In situ characterisation of hydrocarbon layers in TEXTOR by laser induced ablation and laser induced breakdown spectroscopy // J. Nuclear Materials. 2011. V. 415. № 1. P. S1195–S1198. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.11.055>
15. Van Der Meiden H.J. et al. Monitoring of tritium and impurities in the first wall of fusion devices using a LIBS based diagnostic // Nuclear Fusion. 2021. V. 61. № 12. P. 125001. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac31d6>
16. Razdobarin G.T. et al. Detecting dust on plasma-facing components in a next-step tokamak using a laser-induced breakdown spectroscopy technique // Fusion Science and Technology. 2002. V. 41. № 1. P. 32–43. <https://doi.org/10.13182/FST02-A198>
17. Liu J. et al. Study of spectral intensity of the laser ablated tungsten plasma and ablation mass at various laser spot sizes and laser fluence in vacuum environment // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2023. V. 199. P. 106569. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106569>
18. Zhang D.L. Processing of advanced materials using high-energy mechanical milling // Progress in Materials Science. 2004. V. 49. № 3–4. P. 537–560. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(03\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(03)00034-3)
19. Yehia-Alexe S.A. et al. Considerations on hydrogen isotopes release from thin films by laser induced ablation and laser induced desorption techniques // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2023. V. 208. P. 106774. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2023.106774>

20. Zlobinski M. *et al.* Laser-Induced Desorption of co-deposited Deuterium in Beryllium Layers on Tungsten // Nuclear Materials and Energy. 2019. V. 19. P. 503–509.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.04.007>
21. Krat S. *et al.* Tungsten-deuterium co-deposition: Experiment and analytical description // Vacuum. 2018. V. 149. P. 23–28.
22. Kajita S. *et al.* Plasma-assisted laser ablation of tungsten: Reduction in ablation power threshold due to bursting of holes/bubbles // Applied Physics Letters. 2007. V. 91. №. 26.
<https://doi.org/10.1063/1.2824873>

LASER-INDUCED ABLATION AND DESORPTION OF DEUTERIUM-CONTAINING TUNGSTEN FILMS

**E. V. Smirnova^{a,c}, O. S. Medvedev^{a,b}, A. G. Razdobarin^{a,b}, D. I. Elets^{a,b,c},
L. A. Snigirev^{a,c}, I. R. Shubin^{a,c}**

^a*A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^b*National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia*

^c*St. Petersburg’s State University, St. Petersburg, Russia*

Presented by Academician of the RAS N.N. Rozanov

The laser-induced desorption (LID) and laser-induced ablation (LIA) methods are compared with each other regarding the possibility of measurements an absolute quantitative analysis of hydrogen isotopes content in first wall materials of fusion reactors. Deuterium containing tungsten films with a thickness of 300–400 nm on a silicon substrate were used as model samples. To implement the LID, the samples were irradiated with laser pulses with a duration of 200 microseconds and an energy density of 50–150 J/cm², for LIA – 12 ns and 5–15 J/cm². The registration of residual gases was carried out by quadrupole mass spectrometry. Computer simulation of laser pulse heating was performed for the LID process. The simulation results and experimental data showed that heating at an energy density of 100–150 J/cm² is sufficient to degas tungsten films of the studied thickness. A comparison of the amount of desorbed deuterium in the LID (150 J/cm²) and LIA (15 J/cm²) modes shows that it is identical within the measurement error and is equal to $4.15 \pm 0.15 \cdot 10^{14}$ cm⁻².

Keywords: laser-induced ablation, laser-induced desorption, modeling, first wall, tokamak, tritium accumulation diagnostic