

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 533.924;536.331

АНАЛИЗ КРАТЕРОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ ПЛЕНОК ПИКОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ДЛЯ ЛАЗЕРНО- АССИСТИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ

© 2025 г. Н. Е. Ефимов^{a, b, *}, Д. Н. Синельников^a, М. В. Гришаев^{a, b},
Ю. М. Гаспарян^{a, b}, С. А. Крат^a, И. А. Сорокин^{a, c}

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

^bСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^cФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, 141120 Россия

*E-mail: neefimov@mephi.ru

Поступила в редакцию 18.09.2024 г.

После доработки 30.09.2024 г.

Принята к публикации 07.10.2024 г.

В работе проведено измерение профилей кратеров, полученных при воздействии лазерного излучения пикосекундной длительности с длиной волны 1064 нм и плотностью энергии в диапазоне 0.4–7.0 Дж/см² на поверхность вольфрамовых пленок, с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, а также контактной профилометрии. Показано наличие нескольких механизмов эрозии поверхности при данных параметрах облучения. Проведен анализ влияния формы кратеров на сигнал лазерно-ассистированной масс-спектрометрии при облучении дейтерированных вольфрамовых пленок.

Ключевые слова: тонкие пленки, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, профилометрия, накопление водорода

DOI: 10.56304/S2079562925020010

ВВЕДЕНИЕ

С развитием и удешевлением лазеров большое распространение получили методы диагностики поверхности, основанные на облучении интересующего объекта лазерным излучением с последующим анализом сформированных потоков частиц и излучения. В частности, если плотность мощности в импульсе достаточно высока, то реализуется режим образования на парах испарившегося материала искровой плазмы. В таком случае элементный анализ поверхности может быть осуществлен по оптическим спектрам сформированной плазмы. Этот метод, называемый лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопией (ЛИЭС), привлекателен возможностью реализации в виде компактного устройства и большим диапазоном измеряемых компонентов, что обусловило его крайне широкое распространение в различных отраслях: в металлургии для определения марок сталей, в искусстве для исследования методов изготовления и подлинности объектов культурного наследия [1], в пищевой промышленности, в частности, для классификации региона происхождения красных вин [2] и прочих [3]. Другая разновидность метода, предполагающая сепара-

цию частиц из лазерно-индуцированной плазмы по времени пролета, широко применяется в биологии и фармацевтике для детектирования сложных органических соединений и кластеров с высокой массой [4].

Целая группа лазерно-ассистированных методов рассматривается в качестве средств *in vacuo* диагностики состояния обращенных к плазме элементов (ОПЭ) термоядерных установок (ТЯУ). В первую очередь, для контроля процессов эрозии, пересадки и скорости накопления изотопов водорода в конструкционные материалы [5–9]. Перспективность применения данных средств к задачам квазистационарного управляемого термоядерного синтеза обусловлена хорошим пространственным разрешением, высокой скоростью сканирования, а самое главное – возможностью дистанционного бесконтактного анализа, что актуально в силу ограничений нормами безопасности на доступ в разрядную камеру ТЯУ при работе с радиоактивным тритием.

При этом несмотря на то, что лазерные методы уже нашли многочисленные применения в различных областях науки и техники, некоторые вопросы их использования для диагностики накопле-

ния водорода в ТЯУ остаются открытыми. Одной из задач при разработке лазерных методов для ТЯУ является достижение необходимой точности *in vacuo* измерений. Так, для лазерных диагностик накопления изотопов водорода в ОПЭ в строящемся токамаке ИТЭР установлено допустимое относительное отклонение в точности определения концентрации в 20% [10]. При лазерно-ассистированной квадрупольной масс-спектрометрии (ЛА-КМС) определение концентрации захваченных компонентов рабочего газа ТЯУ в твердом теле производится по зарегистрированному КМС числу атомов, нормированному на объем, из которого выходил газ при облучении лазером. Соответственно, одним из источников погрешности при определении концентрации по ЛА-КМС является погрешность определения этого объема, зависящего как от параметров облучения, так и от материала мишени.

При этом единой устоявшейся модели эрозии материала при его облучении ультракороткими (пико- и фемтосекундного диапазона) импульсами до сих пор не сформировалось. Это во многом обусловлено тем, что для теоретического описания механизма поглощения энергии лазера поверхностью твердого тела и формирования кратера необходим учет широкого набора свойств материала: тепловых (теплоемкости и теплопроводности электронного газа и кристаллической решетки), оптических (зависимость коэффициента отражения от температуры) и механических. На данный момент существует несколько параллельно развивающихся подходов, применяемых для различных длительностей лазерного воздействия и плотностей энергии в импульсе [11–13]. Внимание к эрозии материала под воздействием лазерного облучения, демонстрируемое большим числом теоретических и экспериментальных работ, обусловлено широкой областью применения лазерных технологий. Таким образом, актуальна задача исследования процессов модификации поверхности под воздействием лазерных импульсов коротких и ультракоротких диапазонов.

Данная работа посвящена измерению профилей кратеров при облучении вольфрама лазерным излучением пикосекундной длительности с длиной волны 1064 нм при различных плотностях энергии методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) и контактной стилусной профилометрии. В работе также проведен анализ корреляции размеров кратеров с сигналом ЛА-КМС на примере дейтерированных вольфрамовых пленок, как кандидатных материалов обращенных к плазме элементов термоядерных установок.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Облучение вольфрамовых пленок осуществлялось с помощью твердотельного Nd:YAG лазера “LOTIS LS-2151” с активной синхронизацией мод,

позволяющего получать импульсы с фиксированной длительностью 80 ± 5 пс с варьруемой энергией на выходе до 80 мДж. Диаметр пятна на выходе составлял 9 мм. Варьирование энергии в пучке производилось через энергию лампы накачки усилительного каскада и контролировалось посредством пироэлектрического измерителя энергии “Ophir StarBright”. Следует отметить, что так как распределение энергии в лазерном пучке неоднородно, то представленные в дальнейшем значения плотности энергии являются усредненными по площади кратера. Плотность энергии в центре пятна при этом могла быть выше. Воздействие на образцы производилось в вакууме при давлении остаточного газа порядка 10^{-5} Па и фокусировке излучения в пятно диаметром около 0.9 мм. Для облучения различных участков поверхности образцы были закреплены на подвижной платформе с пьезоприводом.

Определение профилей кратеров производилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) “Tescan Vega 3”, оснащенном рентгеновским спектрометром “INCA-xAct” для реализации ЭДС. В то время, как с помощью СЭМ возможно определение характерной площади кратера и толщины пленки за счет анализа среза образца, применение ЭДС может в ряде случаев позволить определять толщину эродировавшей области с высокой точностью (вплоть до десятков нм). Подробное описание принципов количественной ЭДС приведено в работах [14, 15]. Идея метода заключается в локальном облучении двухслойной мишени пучком электронов с энергией порядка единиц-десятков кэВ и сопутствующим измерением спектра характеристического рентгеновского излучения. При этом если глубина генерации рентгеновского излучения выше толщины верхнего слоя, что определяется длиной пробега облучающих электронов, то в спектре будут присутствовать линии как элементов пленки, так и подложки. Сравнение интенсивностей линий элементов пленки и подложки позволяет определить толщину пленки в области облучения электронами. Для абсолютных измерений могут быть использованы как спектры образцов с хорошо известной толщиной пленки, так и численные коды для моделирования ЭДС спектров от произвольных мишеней.

В качестве образцов для анализа кратеров, образованных при лазерном воздействии, были использованы пленки вольфрама, осажденного на подложку из кремния в разряде с полым катодом [16]. Выбор кремния в качестве подложки главным образом обусловлен крайне низкой шероховатостью его поверхности. Для интерпретации рентгеновских спектров был выбран Монте-Карло код “Casino” [17], получивший широкое применение в задачах определения толщины пленок на базе спектров ЭДС. Так, на рис. 1 представлены полученные с помощью данного кода градуиро-

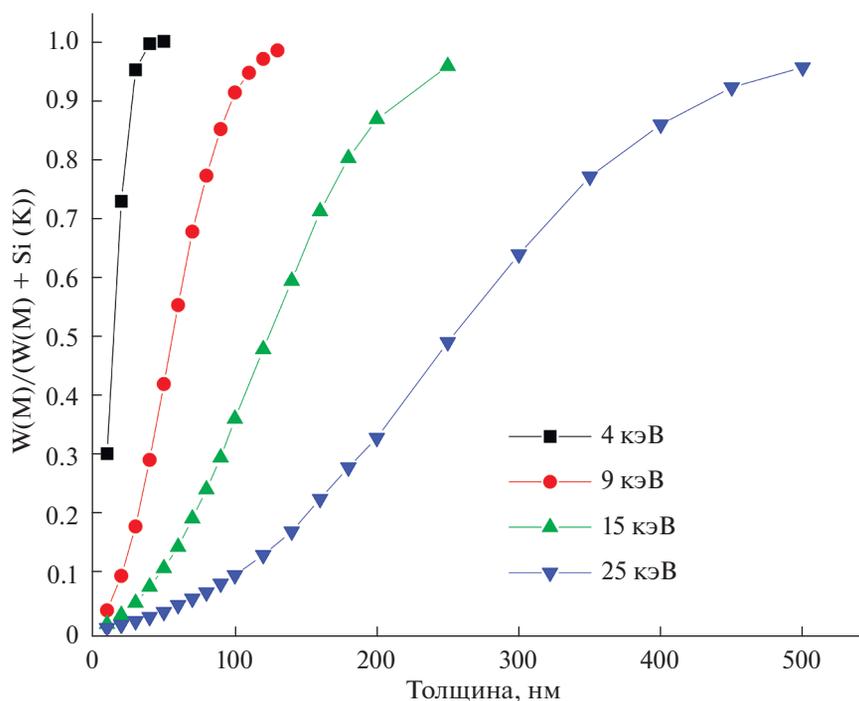


Рис. 1. Зависимость интенсивности линии вольфрама M_{α} , отнесенной к суммарной интенсивности линий вольфрама (M_{α}) и кремния (K_{α}), от толщины пленки для образца вольфрама на кремнии при различных энергиях электронного пучка. Моделирование в коде “Casino”.

вочные кривые для пленок вольфрама с плотностью 19.3 г/см^3 и толщиной до 500 нм на толстой кремниевой подложке для энергий электронного пучка, реализуемых в имеющемся СЭМ. Для сравнения сигналов пленки и подложки были выбраны наиболее яркие линии: M_{α} для вольфрама и K_{α} для кремния. Согласно литературным данным для абляции вольфрама при схожих по порядку величины параметрах лазерного импульса (5.5 Дж/см^2 при импульсе 150 пс) максимальная глубина кратера оказывается менее 200 нм [18]. В связи с этим для покрытия всего диапазона остаточных толщин пленок целесообразно использовать энергию пучка электронов 25 кэВ.

После нескольких выстрелов лазером с различными энергиями в различные участки на поверхности образца были извлечены для анализа профилей кратеров с помощью СЭМ-ЭДС. Обзорный СЭМ снимок представлен на рис. 2а. Белой стрелкой на представленном снимке показано направление уменьшения энергии лазера. Можно заметить, что размер пятен практически не уменьшается с энергией. На рис. 2б показан отдельный кратер для плотности энергии 3.7 Дж/см^2 . Белыми крестиками показаны области ЭДС измерений для определения остаточных толщин пленки. Глубина эрозии в каждой точке определялась как разница полученного в ней значения остаточной толщины и толщины пленки за пределами области лазерного воз-

действия, усредненной по нескольким точкам в окрестности кратера. Аналогичные серии измерений производились и для остальных кратеров.

По окончании также была проведена профилометрия кратеров с помощью прецизионного контактного профилометра “Veeco Dektak 150” с пространственным разрешением 100 нм и разрешением по глубине порядка 1 нм. При этом следует отметить, что при определении профилей кратеров с помощью ЭДС и контактного профилометра “угол” измерения для двух диагностик мог быть различным.

2. АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ КРАТЕРОВ

Результаты измерения профилей кратеров с помощью ЭДС, а также сравнение с данными профилометрии для двух энергий лазера представлены на рис. 3. Имеет место уменьшение максимальной глубины кратеров со снижением энергии в импульсе, в то время как диаметры кратеров практически не меняются. На профилограммах видно, что диаметры кратеров имеют хорошее количественное согласие с СЭМ. Для плотности энергии 3.7 Дж/см^2 наблюдается согласие максимальной глубины кратера по ЭДС и по контактной профилометрии. Для кривых, измеренных при энергии 4.6 Дж/см^2 максимальная глубина кратера оказывается выше толщины пленки, оцененной с помощью ЭДС в $160 \pm 20 \text{ нм}$, в связи с чем на-

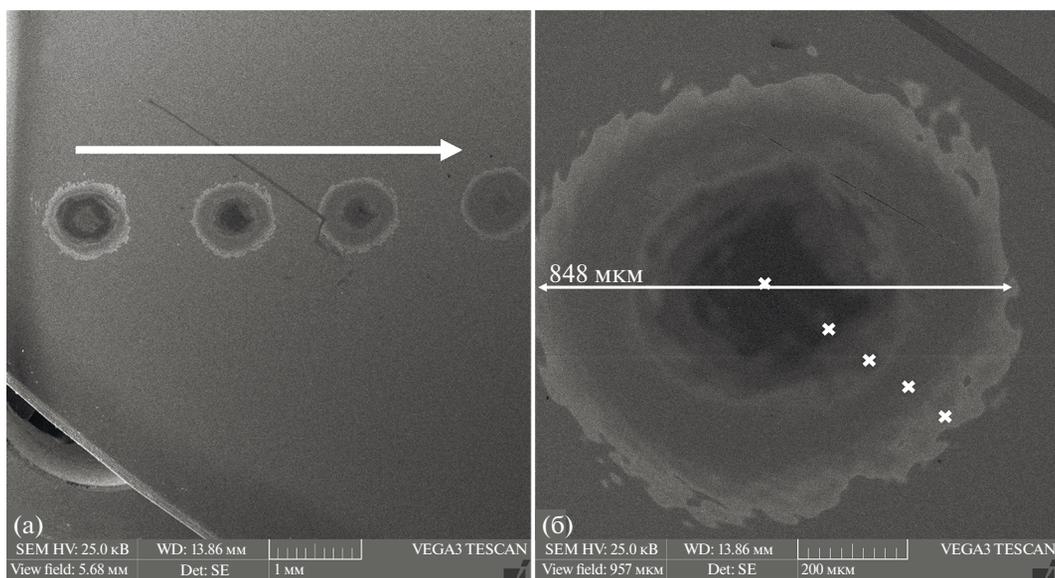


Рис. 2. Обзорный снимок СЭМ кратеров при облучении образцов вольфрама на кремнии лазером. Белой стрелкой указано направление уменьшения энергии лазера (а). Снимок кратера при плотности энергии лазера 3.7 Дж/см^2 с указанием точек ЭДС измерений с помощью белых крестиков (б). Получены с помощью сканирующего электронного микроскопа “Tescan Vega 3”.

блюдается расхождение оценок ЭДС, которая фактически определяет остаточную толщину пленки, и профилометрии. В то же время, наблюдается расхождение форм кратеров, измеренными двумя данными методиками.

На рис. 4 представлены остальные профилограммы для кратеров с различными энергиями в импульсе, измеренные контактной профилометрией. Можно отметить несколько закономерностей. Во-первых, для всех импульсов на границе кратера наблюдаются бортики (1, рис. 4), свидетельствующие о выплескивании материала расплава из кратера. Во-вторых, для кратеров, чья плотность энергии оказывается выше 0.4 Дж/см^2 , можно выделить две области (2, 3, рис. 4), существенно отличающиеся по форме и характеру изменения в зависимости от энергии импульса. В-третьих, при плотностях энергии выше 0.4 Дж/см^2 на дне кратера наблюдаются неоднородности с характерными перепадами порядка 50 нм . При этом форма дна кратера на профилограмме для энергии лазера 4.6 Дж/см^2 близка к плоской. В данном случае отличие от кратеров с меньшими плотностями энергии обусловлено тем, что для кратера, образованного при 4.6 Дж/см^2 глубина оказалась выше толщины пленки вольфрама.

Область 2 появляется при превышении порогового значения плотности энергии лазера, расположенного между 0.4 и 2.3 Дж/см^2 . Примечательно, что ее глубина не зависит от энергии лазера. В то же время глубина области 3 сильно зависит от плот-

ности энергии. Схожие по форме профилограммы наблюдались в работе [19] при облучении тантала фемтосекундными лазерными импульсами.

Основная гипотеза состоит в том, что область 2 появилась за счет так называемой “откольной” абляции. Под отколом в данном случае понимается разрыв в твердой мишени при фронтальном ударе, в частности, за счет лазерного импульса высокой интенсивности, генерирующего мощную ударную волну. Разрыв материала и откол пленки возникает в области интерференции прямой волны и отраженной от тыльной стороны образца обратной волны. Данный эффект более подробно описан в работе [20], посвященной обзору текущего состояния проблемы по лазерной абляции материалов. Рассмотрение этого процесса с позиции интерференционной модели возникло при наблюдении на поверхности кратеров волн, напоминающих кольца Ньютона [21]. Одной из интересных особенностей данного режима абляции является не зависящая от плотности энергии глубина отколотой части кратера [22]. Как описано выше, подобная особенность имеет место и в нашем случае, что может служить подтверждением характера абляции в данной области. При этом следует отметить, что хотя в литературе подобный режим абляции упоминается преимущественно для ультракоротких импульсов, имеются оценки, согласно которым его реализация возможна и для пикосекундных длительностей импульса [23].

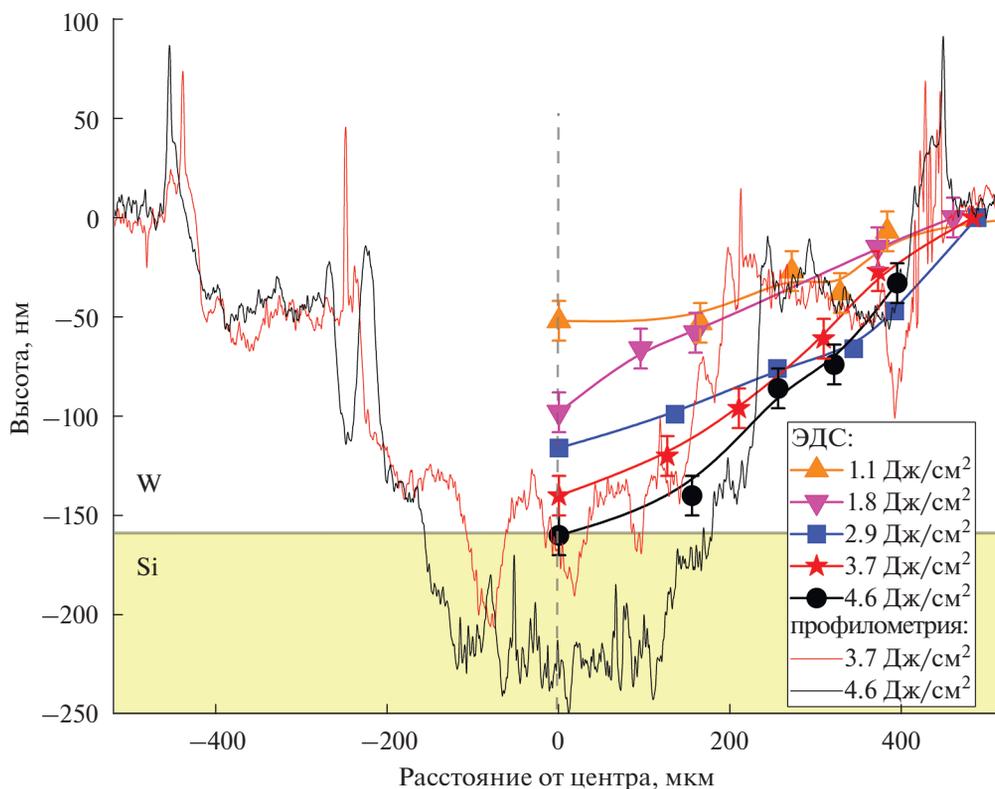


Рис. 3. Профилограммы кратеров на пленке вольфрама на кремнии при различных энергиях лазера, полученные с помощью ЭДС и контактной профилометрии.

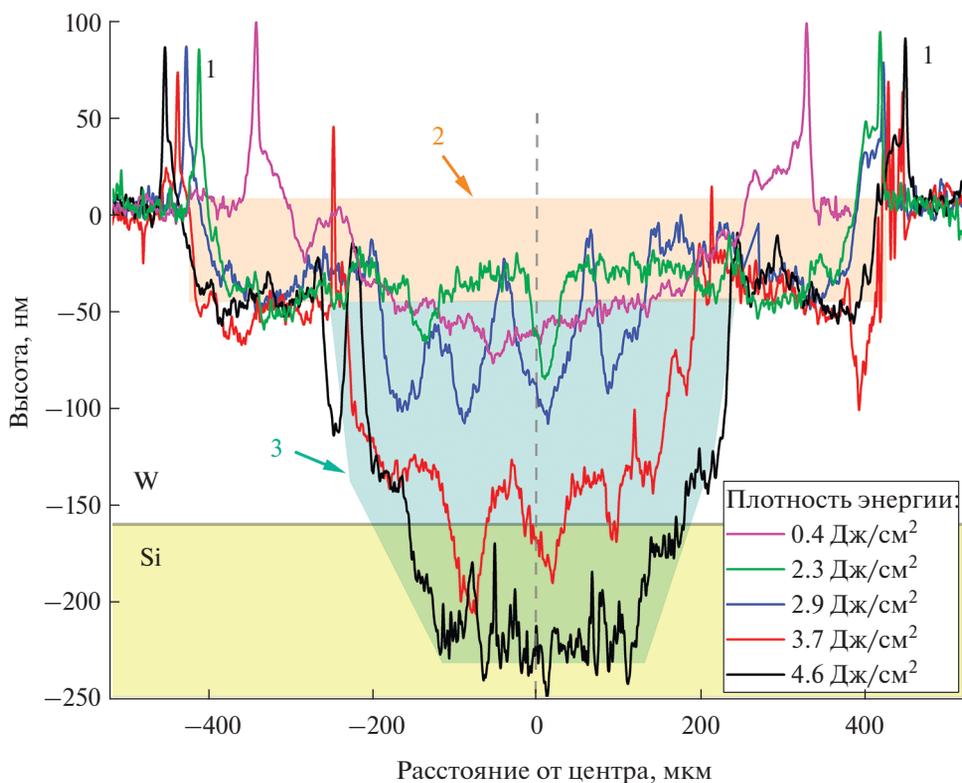


Рис. 4. Профилограммы кратеров на пленке вольфрама на кремнии при различных энергиях лазера, полученные с помощью контактной профилометрии: 1 – бортики, 2 – область откольной абляции, 3 – область фазового взрыва.

В свою очередь, для области 3 на рис. 4 наблюдается другой режим абляции, упоминаемый в литературе как “фазовый взрыв” и обусловленный газодинамическим разлетом низкотемпературной плазмы за счет высоких внутренних давлений и температур [24]. В литературе отмечается, что хотя он требует больших значений плотности энергии, чем откольная абляция, они часто наблюдаются одновременно, как и в нашем случае. При этом глубина данной области растет с плотностью энергии в импульсе.

Можно отметить, что ЭДС в отличие от контактной профилометрии не демонстрирует резких неоднородностей. Глубина эрозии на краях кратера согласно ЭДС оказывается выше, чем при контактной профилометрии. Это может быть обусловлено тем, что ЭДС фактически определяет не толщину пленки в конкретном месте, а количество атомов до подложки. Полученные расхождения можно объяснить тем, что в их области границы кратера обладают пористой структурой. Соответственно, в то время как профилометрия дает информацию по границе структур, ЭДС позволяет интерпретировать ее как материал меньшей толщины или меньшей плотности. Эффект пено- и порообразования и в самом деле наблюдается при лазерном облучении и объясняется обычно рекристаллизацией материала, гидродинамическими эффектами, а также переосаждением испаренного материала [25, 26].

Таким образом, при лазерной абляции короткими импульсами образуемые кратеры могут иметь сложный рельеф и, вероятно, неоднородную по поверхности структуру материала. Это сильно усложняет задачу определения объема эрозии и, как следствие, снижает точность лазерно-ассистированных методов количественного анализа поверхности.

Для преодоления этих трудностей в задачах дистанционного *in situ* контроля рельефа поверхности, глубины эрозии и толщины осадений предлагаются методы, основанные на совмещении ЛА-КМС диагностики с системами LIDAR и двухчастотной цифровой голографии [27]. Однако разрешение по глубине таких методов не позволяет анализировать рельеф и кратеры менее 1 мкм. В то же время, анализ результатов эрозии модельных образцов с помощью комбинации методов стилусной профилометрии с ЭДС может позволить лучше понять структуру кратеров с глубиной субмикронного диапазона и, таким образом, помочь спрогнозировать динамику изменения объема кратеров в реальных условиях эксплуатации.

Одним из более радикальных решений проблемы неизвестного профиля кратера может стать облучение области, значительно превосходящей размеры кратера, например, за счет сканирования точечным пучком. Такой подход был реализован в работе [8], посвященной анализу содержания изо-

топов водорода в стенках токамака Глобус-М2. Ввиду того, что форма кратера на исследуемой поверхности была неизвестна, масс-спектрометрия изотопов водорода, выходящих при облучении интересующих образцов лазером, производилась с помощью автоматизированного подвижного зеркала, позволяющего реализовать перемещение пучка по траекториям прямоугольной формы произвольного размера.

3. ЛАЗЕРНО-АССИСТИРОВАННАЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ W-D ПЛЕНОК

Интересно сравнить динамику сигнала лазерной диагностики поверхности с динамикой объема кратеров в зависимости от энергии лазера. Измерения проводились с помощью ЛА-КМС на установке, описанной в работе [28]. В качестве образцов были использованы пленки вольфрама, осажденные на молибден. Образцы получены методом магнетронного осаждения в смеси аргона и дейтерия в установке МР-2 [29] при предварительном отжиге подложки в течение 48 часов при 700 К в высоком вакууме и последующей очистке тлеющим разрядом для улучшения адгезии пленки. При таком методе осаждения распределение дейтерия по глубине близко к однородному, а атомарная концентрация согласно данным термодесорбционной спектроскопии составляет около 1%. Фотографии среза образца и типичного кратера представлены на рис. 5а и 5б соответственно. Как видно, анализ среза образца показал толщину пленки около 1.1 мкм, т.е. она в данном случае значительно больше достигаемых глубин кратера при облучении имеющимся пикосекундным лазером.

На рис. 6 представлены зависимости количества дейтерия, зарегистрированного КМС при облучении дейтерий содержащих пленок (W на Mo) лазерными импульсами с различной энергией, а также соответствующие этим энергиям оценки объемов кратеров. Объемы были рассчитаны в приближении их аксиальной симметрии на основе профилей, полученных с помощью ЭДС и контактной профилометрии на модельных образцах W на Si с рис. 3 и 4. При этом предполагалось, что структура пленок W, полученных осаждением в разряде с полым катодом и при магнетронном осаждении, должна быть схожей. Как видно, расхождение зависимости объема кратера от энергии, оцененного с помощью ЭДС, с зависимостью сигнала дейтерия менее выражено, чем для данных, полученных с помощью контактной профилометрии.

Оценка содержания водорода для плотности энергии 1.8 Дж/см², проведенная на основе данных ЭДС и контактной профилометрии, показала, соответственно, значения 0.8 и 1.2%. Для всех точек полученные значения сходятся по порядку величины с данными термодесорбционной спек-

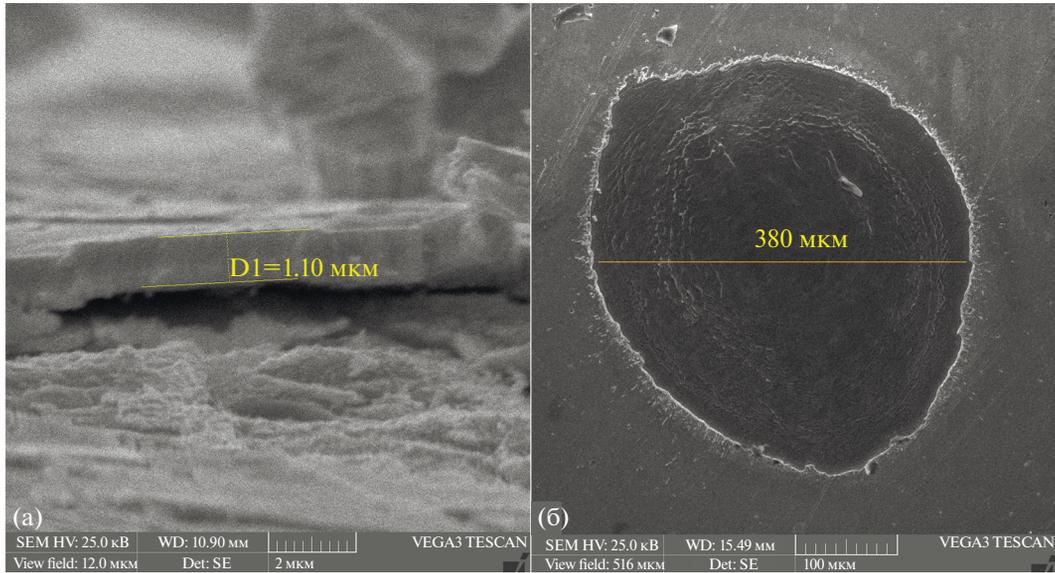


Рис. 5. Изображения торца пленки дейтерированного вольфрама (а) и типичной формы кратера (б), полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа “Tescan Vega 3”.

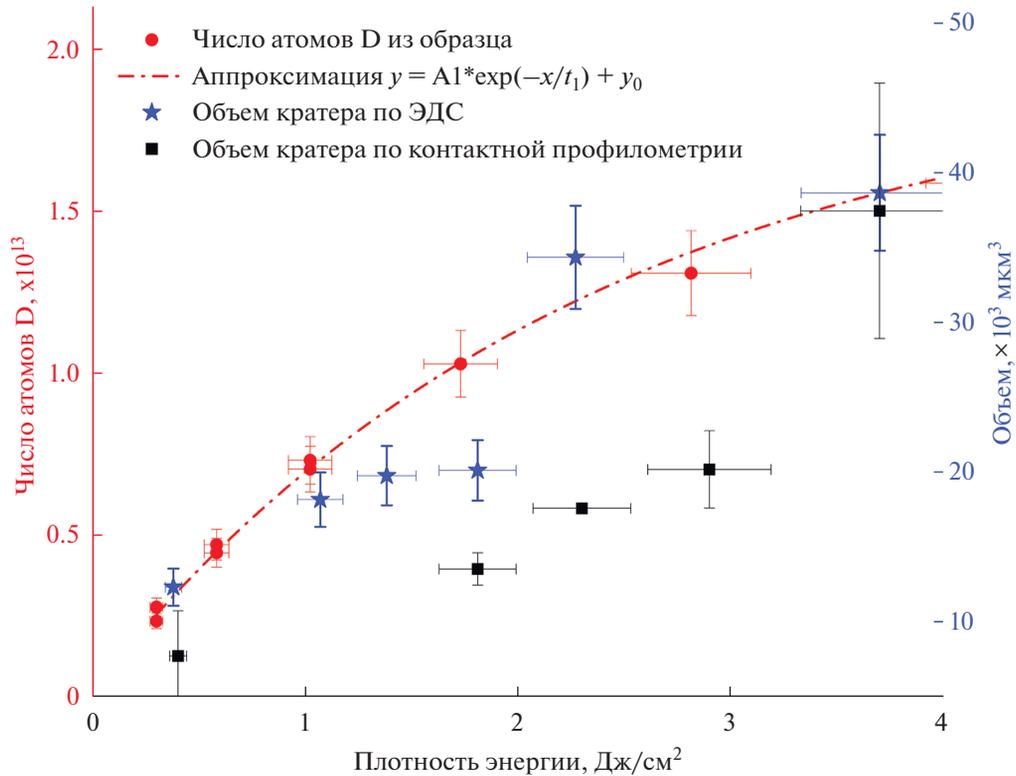


Рис. 6. Графики зависимости количества десорбированного под воздействием лазера дейтерия из W-D пленок, а также объемов кратеров согласно ЭДС и контактной профилометрии от плотности энергии лазера.

троскопии для образцов, задействованных в ЛА-КМС. В то же время, данные профилометрии дают завышенные относительно ЭДС значения для

всех представленных точек. Как было отмечено выше, это может быть связано с тем, что на границах кратеров возможно формирование участков раз-

личной плотности, что усложняет определение объема удаленного вещества по профилю поверхности кратера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено измерение профилей кратеров, полученных на поверхности вольфрама при его облучении лазерным излучением пикосекундного диапазона с плотностями энергии в диапазоне 0.4–4.6 Дж/см². Проведено сравнение результатов, полученных с помощью контактной профилометрии и ЭДС. На профилограммах с контактного профилометра видны особенности рельефа, ассоциируемые с различными режимами абляции материала. В свою очередь, ЭДС, позволяющий оценить количество вещества до подложки в различных участках кратера, демонстрирует более гладкий “рельеф”. Расхождение в данных ЭДС и контактной профилометрии может быть объяснено наличием участков различной плотности.

Подобное поведение может вести к получению завышенных значений концентрации внедренного газа при лазерно-ассистированной масс-спектрометрии ОПЭ ТЯУ в случае оценки эродировавшего объема по данным профилометрии. Сравнение полученных с помощью контактной профилометрии и ЭДС данных с сигналом выхода дейтерия при ЛА-КМС вольфрамовых пленок показало, что оценки объемного содержания водорода, полученные с помощью обоих методов профилометрии, по порядку величины сходятся с данными термодесорбционной спектроскопии. В то же время, данные контактной профилометрии для большинства точек оказываются завышенными по сравнению с данными, полученными с помощью ЭДС.

Для увеличения точности количественных методов, основанных на облучении интересующих поверхностей лазерным излучением в области десятков пикосекунд, может быть целесообразным подбирать режимы облучения, характеризующиеся одним механизмом эрозии поверхности для получения кратеров предсказуемой формы. В частности, за счет снижения плотности энергии лазера ниже порога возникновения откольной абляции, оцененного в данной работе для вольфрамовых пленок в 0.4–2.3 Дж/см².

В случае, когда профиль кратера для данных параметров облучения неизвестен, может быть целесообразной реализация режима сканирования поверхности для достижения областей эрозии, значительно превосходящих размеры кратера при одиночном выстреле, что, однако приведет к снижению пространственного разрешения методики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Раздел 2 работы был выполнен при поддержке гранта Российского научного фонда 22-12-00360 “Лазерная диагностика накопления изотопов водорода во взаимодействующих с плазмой материалах токамака”.

Раздел 3 работы был выполнен при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSWU-2024-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Osticioli I., Mendes N.F.C., Porcinai S., Cagnini A., Castellucci E.* // *Anal. Bioanal. Chem.* 2009. V. 394 (4). P. 1033–1041. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-2653-8>
2. *Moncayo S., Rosales J.D., Izquierdo-Hornillos R., Anzano J., Caceres J.O.* // *Talanta*. 2016. V. 158. P. 185–191. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.05.059>
3. *Asquini C.P.* *Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Handbook of Solid-State Lasers: Materials, Systems and Applications.* 2013. P. 551–571. <https://doi.org/10.1533/9780857097507.2.551>
4. *Ge M.-C. et al.* // *J. Microbiol. Immun. Infect.* 2017. V. 50 (5). P. 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.jmii.2016.06.002>
5. *Philipps V. et al.* // *Nucl. Fusion*. 2013. V. 53 (9). P. 93002–93014. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093002>
6. *Van Der Meiden H.J. et al.* // *J. Instrum.* 2013. V. 8 (11). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/11/C11011>
7. *Efimov N.E., Sinelnikov D.N., Bulgadaryan D.G., Gasparyan Y.M., Vovchenko E.D., Krat S.A.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. V. 86 (5). P. 532–535. <https://doi.org/10.3103/S1062873822050057>
8. *Razdobarin A.G. et al.* // *Plasma Phys. Rep.* 2024. V. 50 (6). P. 667–677. <https://doi.org/10.1134/S1063780X24600853>
9. *Gasparyan Y. et al.* // *Fusion Eng. Des.* 2021. V. 172. P. 112882. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112882>
10. *Malaquias A. et al.* // *J. Nucl. Mater.* 2013. V. 438. P. S936–S939. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.203>
11. *Wu C., Zhigilei L.V.* // *Appl. Phys. A.* 2014. V. 114 (1). P. 11–32. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8086-4>
12. *Papernov S., Schmid A.W.* // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97 (11). P. 114906. <https://doi.org/10.1063/1.1924878>
13. *Inogamov N.A., Petrov Yu.V., Khokhlov V.A., Zhakhovskii V.V.* // *High Temp.* 2020. V. 58 (4). P. 632–646. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20040045>
14. *Bishop H.E., Poole D.M.* // *J. Phys. D.* 1973. V. 6 (9). P. 1142–1158. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/6/9/318>
15. *Sorokin I.A., Kolodko D.V.* // *Thin Solid Films.* 2021. V. 737. P. 138937. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138937>

16. Sorokin I.A., Kolodko D.V. // *Vacuum*. 2023. V. 207. P. 111570.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111570>
17. Demers H., Poirier-Demers N., Couture A.R., Joly D., Guilmain M., de Jonge N., Drouin D. // *Scanning*. 2011. V. 33 (3). P. 135–146.
<https://doi.org/10.1002/sca.20262>
18. Paris P., Butikova J., Laan M., Hakola A., Jōgi I., Likonen J., Grigore E., Ruset C. // *Nucl. Mater. Energy*. 2019. V. 18. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.11.018>
19. Struleva E., Ashitkov S., Komarov P. // *High Temp.* 2018. V. 56 (5). P. 696–701.
<https://doi.org/10.31857/S004036440003357-6>
20. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Samokhin A.A. // *Phys. Usp.* 2017. V. 60 (2). P. 149–160.
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.09.037974>
21. Sokolowski-Tinten K., Bialkowski J., Cavalleri A., von der Linde D., Oparin A., Meyer-ter-Vehn J., Anisimov S.I. // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81 (1). P. 224–227.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.224>
22. Artyukov I.A., Zayarniy D.A., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Saltuganov P.N. // *JETP Lett.* 2014. V. 99 (1). P. 51–55.
<https://doi.org/10.1134/S0021364014010020>
23. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Seleznev L.V., Sinityn D.V., Bunkin A.F., Lednev V.N., Pershin S.M. // *J. Exp. Theor. Phys.* 2013. V. 116 (3). P. 347–362.
<https://doi.org/10.1134/S106377611302012X>
24. Wang X.Y., Downer M.C. // *Opt. Lett.* 1992. V. 17 (20). P. 1450.
<https://doi.org/10.1364/OL.17.001450>
25. Petrović S., Gaković B., Peruško D., Desai T., Batani D., Čekada M., Radak B., Trtica M. // *Laser Phys.* 2009. V. 19 (8). P. 1844–1849.
<https://doi.org/10.1134/S1054660X09150353>
26. Zheng B., Jiang G., Wang W., Mei X., Wang F. // *Opt. Laser Tech.* 2017. V. 94. P. 267–278.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.02.003>
27. Razdobarin A.G. et al. // *Plasma Phys.* 2022. V. 48 (12). P. 1216–1232.
<https://doi.org/10.31857/S0367292122100249>
28. Ефимов Н.Е., Синельников Д.Н., Гришаев М.В., Гаспарян Ю.М., Ефимов В.С., Крат С.А. // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2024. Т. 15 (4). С. 324–331. [Efimov N.E., Sinelnikov D.N., Grishaev M.V., Gasparyan Y.M., Efimov V.S., Krat S.A. // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86 (10). P. 2173–2179
<https://doi.org/10.1134/S1063778823100137>.
<https://doi.org/10.56304/S2079562923030120>
29. Krat S.A., Popkov A.S., Gasparyan Y.M., Vasina Y.A., Prishvitsyn A.S., Pisarev A.A. // *J. Instrum.* 2020. V. 15 (1). P. P01011–P01011.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/01/P01011>

Analysis of Craters in Tungsten Films Irradiated with Picosecond Laser Pulses for Laser-assisted Surface Diagnostics

N. E. Efimov^{1, 2, *}, D. N. Sinelnikov¹, M. V. Grishaev^{1, 2},
 Yu. M. Gasparyan^{1, 2}, S. A. Krat¹, and I. A. Sorokin^{1, 3}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

³Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch), Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow oblast, 141190 Russia

*e-mail: neefimov@mephi.ru

Received September 18, 2024; revised September 30, 2024; accepted October 7, 2024

Abstract—In this work, the profiles of craters obtained by the irradiation of a picosecond laser with a wavelength of 1064 nm and energy density in the range of 0.4–7.0 J/cm² of tungsten films were measured using energy-dispersive X-ray spectroscopy, as well as a contact profilometry. The presence of several mechanisms of surface erosion at given irradiation parameters is shown. The influence of the craters shape on the signal of laser-assisted quadrupole mass spectrometry during irradiation of deuterium-containing tungsten films is analyzed.

Keywords: thin films, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, profilometry, hydrogen retention