

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 538.975

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕСОРБЦИЮ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ СО-ОСАЖДЕННЫХ ЛИТИЕВЫХ СЛОЕВ

© 2026 г. А. К. Хомяков^а, С. А. Крат^{а, *}, А. С. Пришвицын^а,
Е. А. Фефелова^а, Ю. М. Гаспарян^а, А. А. Писарев^а

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

*E-mail: sakrat@mephi.ru

Поступила в редакцию 18.09.2025 г.

После доработки 19.09.2025 г.

Принята к публикации 01.10.2025 г.

Исследовано влияние УФ излучения на удержание дейтерия в со-осажденных литий-дейтериевых слоях. Образцы получались посредством распыления жидколитиевого катода дейтериевой плазмой магнетронного разряда. Анализ содержания дейтерия в пленках проводился методом *in-vacuo* термодесорбционной спектроскопии. После осаждения содержание дейтерия в пленках в среднем $D/Li = 15$ ат. %. Облучение ультрафиолетовым излучением приводило к образованию дополнительных низкотемпературных пиков десорбции ($T \sim 500$ К), а также к исчезновению высокотемпературных ($T > 700$ К) или к их сдвигу в более низкотемпературную область. Полученные результаты в перспективе могут лечь в основу методов обнаружения мест преимущественного накопления гидрида лития в токамаках, а также облегчения процесса удаления трития из внутренних элементов термоядерных установок.

Ключевые слова: тонкие пленки, со-осаждение, литий, дейтерий, гидрид лития, ультрафиолетовое излучение

DOI: 10.56304/S2079562926020028

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем термоядерных установок, рассчитанных на использование дейтерий-тритиевой газовой смеси, является накопление радиоактивного трития во внутренних элементах разрядной камеры [1, 2]. Это накладывает ограничения на время непрерывной работы данных установок из соображений безопасности. Так, к примеру, в строящемся токамаке ИТЭР максимальное допустимое количество трития в установке составляет 700 г [2]. Поэтому контроль накопления и разработка эффективных методов удаления трития из внутренних элементов камер термоядерных установок является актуальной задачей. Разрабатываются различные методы анализа литий-содержащих поверхностей [3, 4], например лазерно-ассистированные методы контроля содержания изотопов водорода [5].

Одним из наиболее перспективных материалов для обращенных к плазме элементов является литий, обладающий низким атомным номером и оказывающий положительное влияние на удержание плазмы в токамаке [6, 7]. Благодаря низкой температуре плавления и высокой температуре кипения [8], литий может использоваться в жидкой форме, что позволяет получить самовосста-

навливающуюся поверхность [9–17]. Литий химически высокоактивен [18], в том числе по отношению к водороду, ввиду чего при взаимодействии лития с водородной плазмой возможно образование твердой гидридной фазы, в том числе в переосажденных из плазмы литиевых слоях [19]. Это может привести к засорению элементов, рассчитанных на течение жидкого лития [13], а также затруднить удаление накопившегося водорода, включая радиоактивный тритий, из установок. Поэтому для термоядерных установок, в которых предполагается использование лития, существует необходимость в создании методик детектирования мест преимущественного накопления гидрида лития, а также удаления тяжелых изотопов водорода с поверхности первой стенки из литиевых слоев, формирующихся на ней. Эти операции необходимо проводить без контакта литий-содержащих элементов с атмосферой (без развакууммирования установки), так как литий химически активен и по отношению к атмосферному воздуху.

Известно, что под действием ультрафиолетового излучения, гидрид лития окрашивается в яркий синий цвет [20, 21], при этом данный эффект не зависит от используемого изотопа водорода. В [22] было изложено предположение, что УФ из-

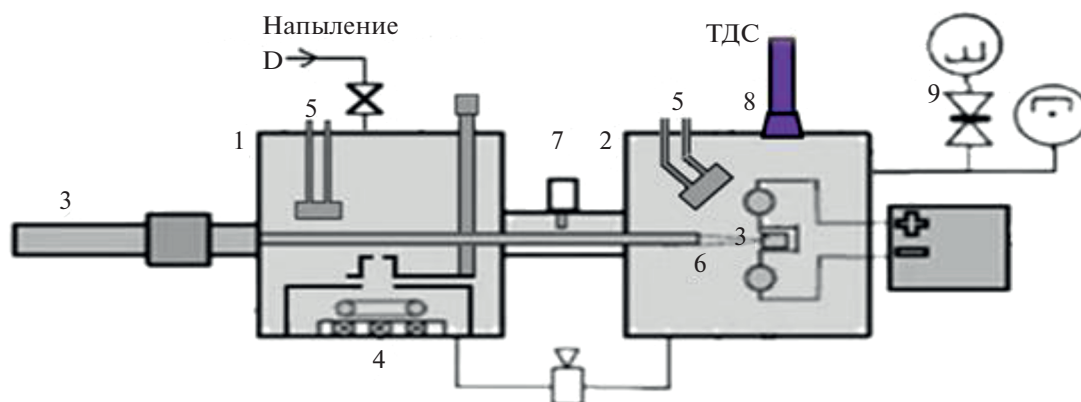


Рис. 1. Схема установки МР-2: 1 — камера напыления; 2 — камера термодесорбционного анализа (ТДС); 3 — ввод движения; 4 — распылительная система; 5 — кварцевые микровесы; 6 — держатель образца; 7 — шибер; 8 — УФ лампа с $\lambda = 180$ нм; 9 — квадрупольный масс-спектрометр (QMS).

лучение может приводить к устойчивому окрашиванию литиевых слоев при наличии гидридной фазы, что объясняется автором образованием и накоплением электронных дефектов в гидриде под воздействием УФ излучения. В результате данного процесса образуются металлические частицы лития с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой, а также смещенные в межузельное пространство молекулы водорода. Ввиду этого можно ожидать, что в ходе таких превращений может происходить десорбция захваченного водорода в процессе диффузии молекул водорода в объеме образца, или же данные превращения могут облегчать процесс десорбции водорода из образца при увеличении его нагрева.

Известно, что свойства со-осажденных слоев, формируемых в результате переосаждения материала стенки из плазмы, могут существенно отличаться от свойств изначальных материалов [19, 23]. Поэтому необходимо было исследовать как ультрафиолетовое излучение будет воздействовать на такие пленки.

В данной работе было исследовано влияние ультрафиолетового излучения на содержание и десорбцию дейтерия из со-осажденных литиевых слоев с целью проверки применимости в качестве основы метода обнаружения мест преимущественного накопления гидрида лития в токамаках, а также облегчения процесса удаления водорода из со-осажденных слоев.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование влияния ультрафиолетового (УФ) излучения на удержание дейтерия в литиевых слоях проводилось на установке МР-2 [24], схема которой представлена на рис. 1.

Процедура осаждения литиевых слоев подробно описана в [19, 25]. Осаждение проводилось по-

средством распыления жидколитиевой мишени, изготовленной по технологии капиллярно-пористых систем [11, 26] в магнетронном разряде постоянного тока дейтериевой плазмой. Толщина напыляемой пленки контролировалась с помощью кварцевых микровесов (5), а скорость напыления составляет в среднем $3 \cdot 10^{-8}$ г/(см² · с), что соответствует 1.8 нм/с; остаточное давление в камере напыления — $3 \cdot 10^{-7}$ мбар, рабочее давление в камере напыления — $4 \cdot 10^{-2}$ мбар. Были выполнены отдельные эксперименты с толщиной слоев 100 или 500 нм. Ранее было показано, что для пленок с толщинами не менее 50 нм характеристики накопления водорода в них слабо зависят от толщины [19, 27].

После осаждения образец переносился из камеры напыления (1) в камеру термодесорбционной спектроскопии (2) с помощью магнитного ввода движения (3), после чего закреплялся на специальном держателе (6), затем ввод движения выводился из камеры и шибер (7), соединяющий камеры, закрывался.

УФ облучение производилось в камере термодесорбционной спектроскопии (ТДС), излучение заводилось через смотровое окно с помощью ультрафиолетовой лампы (8) (длина волны основного излучения $\lambda = 180$ нм). Облучение производилось как с образцом, так и без образца при этом излучение попадало как на образец, так и на внутреннюю поверхность камеры ТДС и внутрикамерные элементы установки. В процессе облучения снимались изменения парциальных давлений газов в камере с помощью квадрупольного масс-спектрометра (9).

Содержание дейтерия в образцах измерялось методом термодесорбционной спектроскопии. Производился линейный нагрев образца со ско-

ростью 2 К/с до 1300 К, в процессе нагрева поток газа, выходящий из образца регистрировался с помощью квадрупольного масс-спектрометра. В процессе ТДС анализа в камере поддерживалось давление $1 \cdot 10^{-8}$ мбар. При проведении ТДС-анализа было зафиксировано испарение лития с образца с течением времени с помощью кварцевых микровесов, расположенных в прямой видимости образца.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Облучение поверхности порошка гидрида лития ультрафиолетовым излучением

Для определения характерного времени протекания реакции УФ-излучения с гидридом лития были проведены предварительные опыты с порошком LiH (чистота 99.9%, линейный размер кристаллов LiH — 100 мкм). Для этого был подготовлен специальный макет, позволяющий облучать герметичный сосуд с порошком гидрида лития в аргонной атмосфере УФ излучением. В ходе облучения изменение цвета поверхности порошка контролировалось как визуально, так и по регистрации рассеянного на поверхности гидрида излучения с помощью спектрометра Avantes. Критерием полного превращения гидрида является отсутствие изменений спектра рассеянного на поверхности излучения в совокупности с прекращением изменения цвета гидрида.

Было установлено, что время полной трансформации поверхности кристаллов гидрида лития составляет 5 мин, при этом данные изменения устойчивы в течение нескольких суток. Данные промежуточные результаты позволили выбрать оптимальное время облучения со-осажденных образцов. Толщина получаемых в экспериментах пленок составляла менее 1 мкм, поэтому можно предположить, что облучение в течение 5 мин должно быть достаточно для окончания реакции поверхности пленки с УФ излучением.

3.2. Десорбция под действием УФ излучения при комнатной температуре

На рис. 2 представлено изменение парциальных давлений различных газов в ТДС камере в ходе УФ облучения литиевой пленки толщиной 100 нм. Образец подвергается облучению ультрафиолетовым излучением от УФ лампы при комнатной температуре в течение часа ($t \geq 5$ мин).

При включении облучения ультрафиолетовым излучением образца наблюдается небольшой рост сигнала 44 массы (CO_2), что вероятно связано с разложением остаточных органических соединений на поверхности вакуумной камеры под воздействием УФ излучения. Изменения амплитуд сигналов других масс отсутствуют. Экспоненци-

альное падение сигналов дейтерия D_2 , против H_2 и HD с течением времени связано с постепенной откачкой камеры ТДС после переноса образца из камеры напыления.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что десорбции дейтерия под воздействием ультрафиолетового излучения при комнатной температуре не происходит.

3.3. Влияние УФ облучения на ТДС-спектры Li-D со-осажденных слоев

Термодесорбционные спектры дейтерия для пленок толщиной 100 и 500 нм без и после облучения УФ представлены на рис. 3а и 3б соответственно.

Для обеих толщин Li-D пленки характерно сохранение пика десорбции, соответствующего разложению дейтерида лития $T \sim 700$ К [28]. Облучение ультрафиолетовым излучением приводит к появлению дополнительных низкотемпературных пиков ($T \sim 500$ К) для пленки 500 нм и увеличению амплитуды пиков десорбции для 100 нм, в то же время облучение подавляет десорбцию при высоких температурах ($T > 700$ К), что выражается в смещении высокотемпературных пиков в более низкотемпературную область для пленки 500 нм. Стоит отметить отсутствие высокотемпературных пиков у образцов толщиной 100 нм и небольшое ($\Delta T \sim 50$ К) смещение пика десорбции, соответствующего разложению дейтерида лития в более низкотемпературную область.

На основании полученных данных был построен график зависимости интегрального выхода дейтерия и количества испаренного лития в процессе ТДС-анализа от температуры без предварительного УФ облучения, представленный на рис. 4.

Данный график представлен в двух вариантах: с нормальными осями и с нормированными на единицу. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены значения величин, соответствующие половине испарения/выхода всего дейтерия. Синей пунктирной линией отмечена теоретическая зависимость испарения металлического лития от температуры, полученная на основании данных, представленных в [10].

На основании данного графика можно сделать следующий вывод: существенное испарение лития начинается происходить при температурах ниже начала интенсивного выхода дейтерия из образца на 150 К, так как к моменту испарения 30% лития из образца вышел лишь 1% дейтерия. При достижении 50% испаренного лития количество вышедшего дейтерия достигло 15%. Помимо этого стоит отметить, что к моменту испарения пленки на 55% ожидаемое расчетное значение испарения металлического лития достигло 100%. Из этого

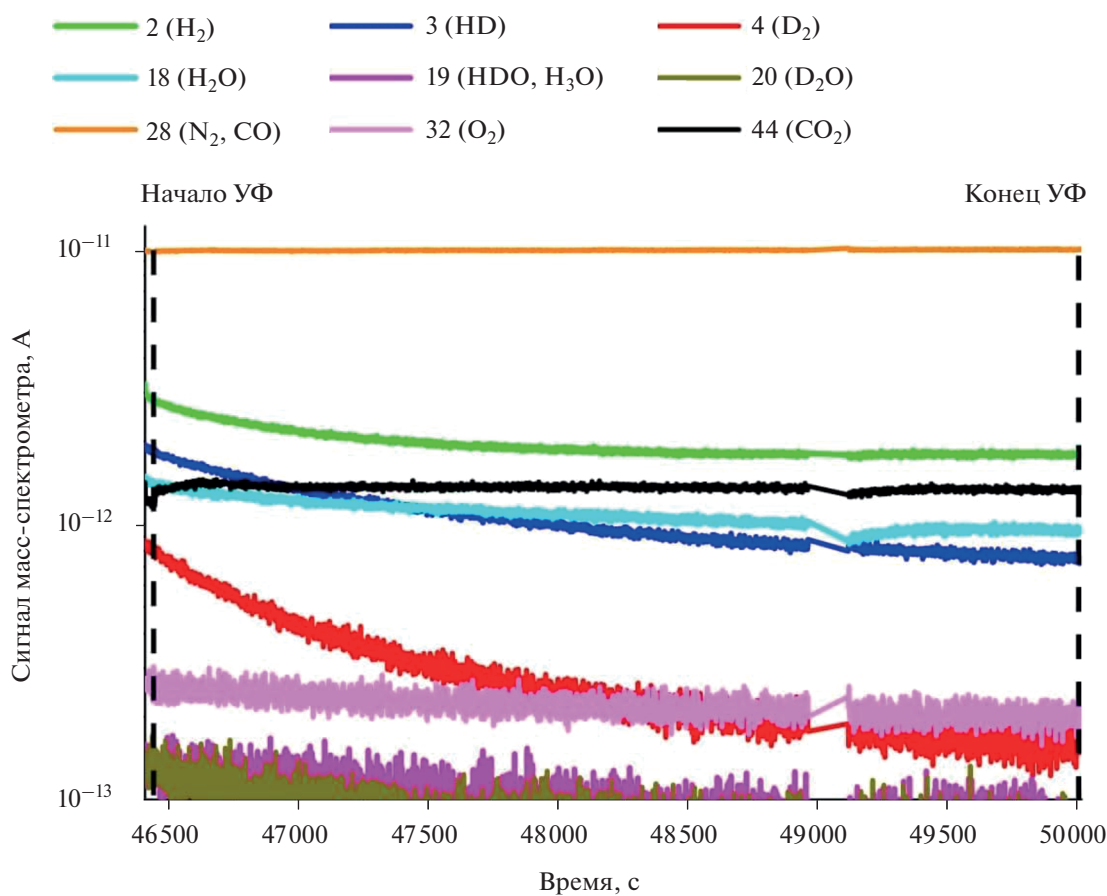


Рис. 2. Потоки десорбции во время УФ облучения ТДС камеры с образцом.

следует, что процесс десорбции дейтерия напрямую зависит от испарения лития и наоборот, что говорит о том, что данный процесс связан с динамическим балансом концентраций лития, дейтерия и дейтерида лития в пленке, из чего следует, что большая часть дейтерия даже после облучения УФ излучением остается в гидридной фазе. Литий испаряется, его количество в образце уменьшается, в результате чего дейтерид лития разлагается для поддержания необходимого уровня лития в образце, в свою очередь освободившийся дейтерий десорбируется с образца, высвобожденный литий в свою очередь снова испаряется. Рассмотрение показаний микробаланса при температурах выше 900 К не представляется возможным ввиду появ-

ления существенных искажений из-за нагрева прибора.

На основании термодесорбционных спектров были рассчитаны интегральные величины содержания дейтерия в со-осажденных слоях, данные приведены в табл. 1.

Содержание дейтерия в со-осажденных слоях во всех экспериментах были близки друг к другу. Различия в содержании для пленки толщиной 100 нм определяется проблемами повторимости эксперимента (напыления полностью идентичной пленки), так как, очевидно, воздействие ультрафиолетовым излучением не может привести к увеличению количества дейтерия в образце в силу отсутствия дополнительного источника дейтерия во время облучения. Полученные данные дополнительно подтверждают вывод об отсутствии десорбции при комнатной температуре под УФ-излучением, сделанный в разделе 3.1.

Продemonстрированное влияние облучения на десорбцию имеет сравнительно небольшой эффект (~10%). Данный факт в совокупности с данными по испарению дает возможность сделать предположение, что изменениям под воздействи-

Таблица 1. Содержание дейтерия в со-осажденных слоях в зависимости от толщины и наличия УФ облучения

	Содержание, ат. % без УФ	Содержание, ат. % с УФ
100 нм	~13	~15
500 нм	~20	~20

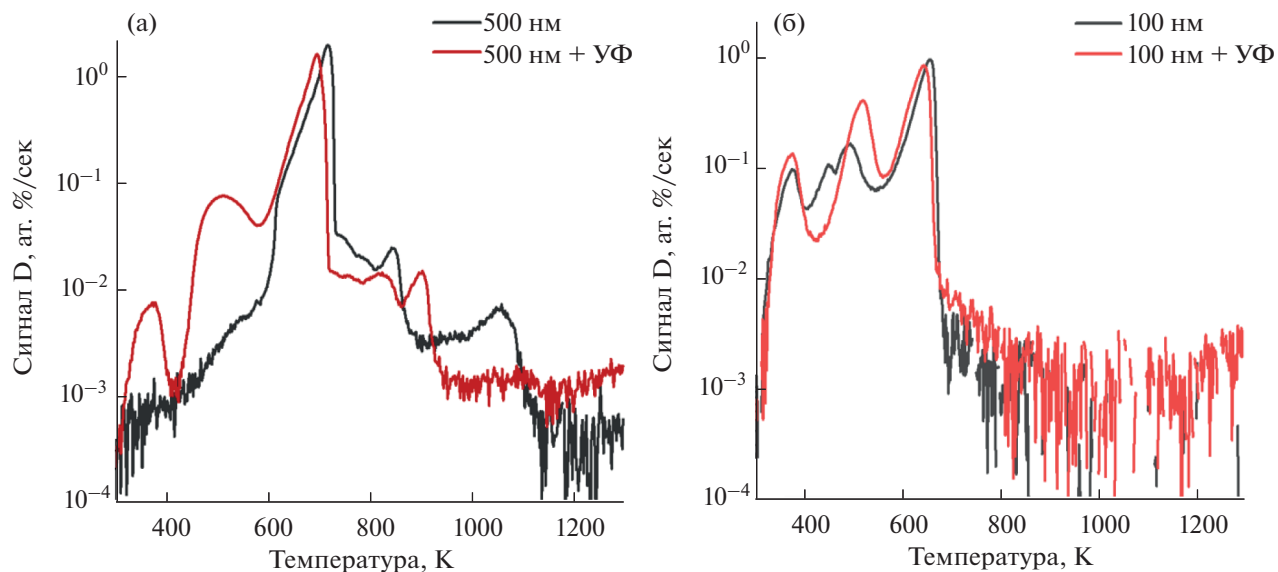


Рис. 3. Термодесорбционные спектры пленок толщиной 500 (а) и 100 (б) нм, подвергшихся облучению УФ излучением, и не облучаемых. По оси абсцисс — температура пленки.

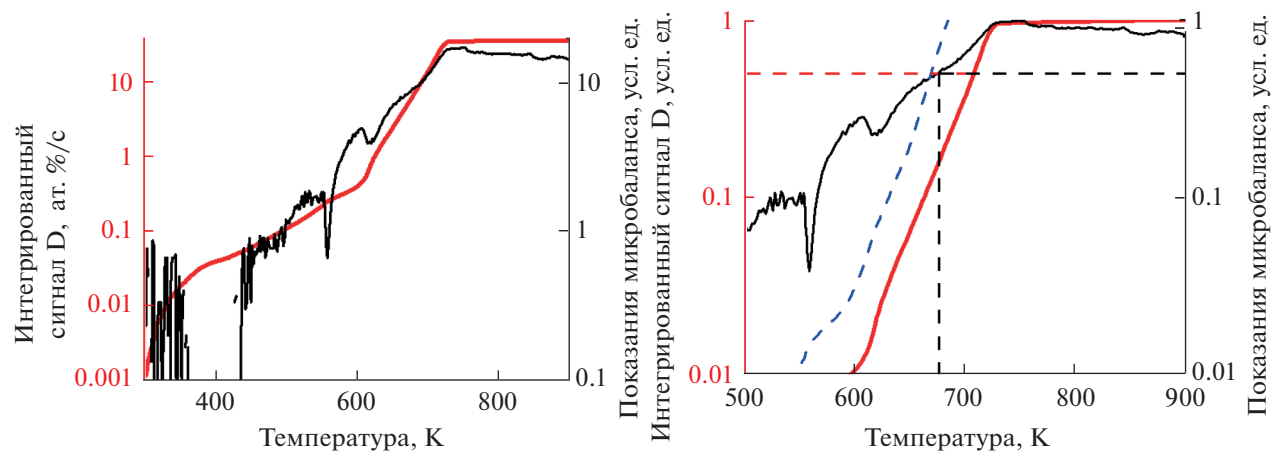


Рис. 4. График зависимости интегрального выхода дейтерия (красная линия) и количества испаренного лития (черная линия) в процессе ТДС-анализа от температуры. По оси абсцисс — температура пленки.

ем УФ излучения подвергается лишь тонкий поверхностный слой образца в отличие от воздействия УФ излучения на кристаллический гидрид лития, для которого превращению подвергается кристалл целиком [22].

Такое существенное различие может быть объяснено следующим образом: предполагается, что исследуемые образцы представляют собой пленки металлического лития с растворенным в нем дейтерием, в объеме которого находятся вкрапления гидридной фазы. Схематичное изображение возможного строения литиевой пленки на поверхности подложки и воздействия на нее УФ излучения представлено на рис. 5.

В рамках модели [22], трансформация гидрида лития под УФ излучением объясняется образованием и накоплением электронных дефектов [12]. В диэлектриках, которым является гидрид лития, электронные дефекты могут распространяться через материал даже при локальном воздействии излучения. В этом случае, можно ожидать, что каждый отдельный кристаллит, подвергшийся воздействию, подвергнется трансформации по всему своему объему. При этом распространение электронных дефектов не может распространяться от одного кристаллита к другому, ввиду того, что между ними расположен металлический литий, по которому транспорт электронных дефектов невозможен. Глубина проникновения ультрафи-

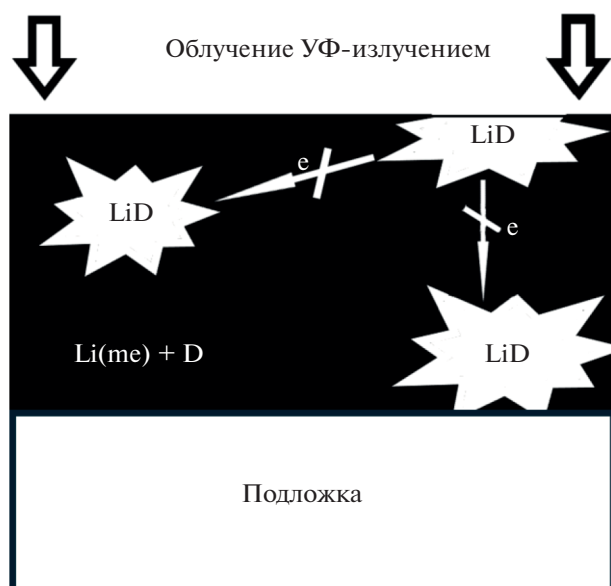


Рис. 5. Схематичное изображение возможной картины взаимодействия УФ излучения с со-осажденной литиевой пленкой.

олетового излучения в металлический литий составляет единицы нанометров, что существенно меньше толщины исследованных пленок [29]. Поэтому в рамках данных предположений, воздействие УФ излучения на со-осажденную пленку будет ограничено приповерхностным слоем.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения предварительных опытов по облучению УФ-излучением порошка гидрида лития было установлено время полной трансформации кристаллических частиц (~100 мкм) гидрида лития, которое составило 5 мин, а также подтверждена устойчивость изменения цвета гидрида лития под действием ультрафиолетового излучения на масштабе времени ~1 нед.

Установлено, что выхода дейтерия при облучении со-осажденных литий-дейтериевых слоев УФ излучением при комнатной температуре не происходит. После облучения ультрафиолетовым излучением появляются дополнительные низкотемпературные пики десорбции ($T \sim 500$ K), а высокотемпературная часть ($T > 700$ K) пропадает или сдвигается в более низкотемпературную область. Основной пик десорбции ($T \sim 700$ K), соответствующий разложению LiD сохраняется после облучения УФ-излучением.

На основании полученных данных можно предположить, что воздействие УФ излучения влияет только на приповерхностную область со-осажденного слоя и не распространяется на всю его глубину.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке НИОКР “Физико-химические основы разработки литиевых компонент, обращенных к плазме” (FSWU-2025-0004), выполняемого в рамках федерального проекта “Технологии термоядерной энергетики” национального проекта “Новые атомные и энергетические технологии”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Pitts R.A. et al.* Plasma-wall interaction impact of the ITER re-baseline // Nucl. Mater. Energy. 2025. V. 42. P. 101854.
2. *Roth J. et al.* Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER // J. Nucl. Mater. 2009. V. 390–391. P. 1–9.
3. *Krat S. et al.* Elastic backscattering as a method for the measurement of the integral lithium content in thin films on fusion-relevant substrates // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2019. V. 455. P. 124–133.
4. *Вовченко Е.Д. и др.* Анализ приповерхностных слоев литиевых покрытий при помощи техники лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии // Ядерн. физ. инжинир. 2019. Т. 10 (2). С. 101–106.
5. *Ефимов Н.Е. и др.* Анализ кратеров при лазерном облучении вольфрамовых пленок пикосекундными импульсами для лазерно-ассистированной диагностики поверхности // Ядерн. физ. инжинир. 2025. Т. 16 (2). С. 213–221.
6. *Mirnov S.* Plasma-wall interactions and plasma behaviour in fusion devices with liquid lithium plasma facing components // J. Nucl. Mater. 2009. V. 390–391 (1). P. 876–885.
7. *Гаспарян Ю.М., Крат С.А.* Влияние выбора материала облицовки стенок термоядерных установок на накопление изотопов водорода // Вопр. атом. науки техн. Сер.: термояд. синтез. 2024. Т. 47 (1). P. 5–14.
8. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A.* Application of lithium in systems of fusion reactors. 1. Physical and chemical properties of lithium // Plasma Devices Oper. 2009. V. 17 (1). P. 42–72.
9. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Semenov V.V.* Comparative analysis of the possibility of applying low-melting metals with the capillary-porous system in tokamak conditions // Phys. At. Nucl. 2016. V. 79 (7). P. 1163–1169.
10. *Mirnov S.V. et al.* Lithium Experiment in tokamak T-11M and concept of limiter tokamak-reactor. 21st IAEA Fusion Energy Conf. Chengdu, China. 2006. No. 12. P. 41–43.
11. *Vertkov A.V. et al.* Progress in development and application of lithium based components for Tokamak // Fusion Eng. Des. 2014. V. 89 (7–8). P. 996–1002.
12. *Tabares F.L. et al.* Conference Report on the 4rd International Symposium on Lithium Applications // Nucl. Fusion. 2016. V. 56 (12). P. 127002.
13. *Ruzic D.N. et al.* Flowing liquid lithium plasma-facing components – Physics, technology and system analysis of the LiMIT system // Nucl. Mater. Energy. 2017. V. 12. P. 1324–1329.
14. *Morgan T.W. et al.* Liquid metals as a divertor plasma-facing material explored using the Pilot-PSI and Mag-

- num-PSI linear devices // *Plasma Phys. Controlled Fusion*. 2018. V. 60 (1). P. 14025.
15. Kugel H.W. et al. NSTX plasma operation with a Liquid Lithium Divertor // *Fusion Eng. Des.* 2012. V. 87 (10). P. 1724–1731.
 16. Goldston R.J. et al. Recent advances towards a lithium vapor box divertor // *Nucl. Mater. Energy*. 2017. V. 12. P. 1118–1121.
 17. Тулубаев Е.Ю. и др. Методика исследования процесса охлаждения макета модуля литиевого дивертора (МЛД) в условиях высоких энергетических нагрузок // *Ядерн. физ. инжинир.* 2024. Т. 15 (3). С. 291–299.
 18. Субботин В.И. и др. Литий. 1999. Москва: ИздАТ.
 19. Krat S.A. et al. Lithium-deuterium co-deposition // *J. Nucl. Mater.* 2023. V. 584. P. 154598–154598.
 20. Остроушко Ю.И. и др. Литий, его химия и технология. 1960. Москва: Атомиздат.
 21. Liu X., Liu J. Effect of air humidity on microstructure and phase composition of lithium deuteride corrosion products // *Corros. Sci.* 2017. V. 115. P. 129–134.
 22. Пилипенко Г.И. Локальные состояния в гидриде и дейтериде лития. Дисс. д.ф.-м.н. 1996. Екатеринбург: УГТУ-УПИ.
 23. Krat S. u et al. Effect of helium presence on tungsten-deuterium co-deposited films // *Nucl. Mater. Energy*. 2023. V. 34. P. 101336–101336.
 24. Krat S.A. et al. A setup for study of co-deposited films // *J. Instrum.* 2020. V. 15 (01). P. P01011.
 25. Krat S.A. et al. Deuterium release from lithium–deuterium films, deposited in the magnetron discharge // *Vacuum*. 2014. V. 105. P. 111–114.
 26. Golubchikov L.G. et al. Development of a liquid-metal fusion reactor divertor with a capillary-pore system // *J. Nucl. Mater.* 1996. V. 233–237 (1). P. 667–672.
 27. Крам С.А. и др. Сравнение удержания дейтерия в вольфрамовых пленках различной толщины // *Ядерн. физ. инжинир.* 2024. Т. 15 (3). С. 218–223.
 28. Tonks J.P. et al. Corrosion studies of LiH thin films // *J. Nucl. Mater.* 2017. V. 484. P. 228–235.
 29. Короленко П.В. Взаимодействие излучения с веществом. 2011. Москва: Изд-во МГУ.

Effect of Ultraviolet Radiation on Deuterium Desorption from Co-Deposited Lithium Layers

A. K. Khomyakov¹, S. A. Krat^{1, *}, A. S. Prishvitsyn¹,
E. A. Fefelova¹, Yu. M. Gasparyan¹, and A. A. Pisarev¹

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

*e-mail: sakrat@mephi.ru

Received September 18, 2025; revised September 19, 2025; accepted October 1, 2025

Abstract—The effect of UV radiation on deuterium retention in co-deposited lithium-deuterium layers has been investigated. The samples were obtained by sputtering a liquid lithium cathode with a deuterium plasma of a magnetron discharge. The deuterium content in the films was analyzed by in-vacuo thermal desorption spectroscopy. After deposition, the deuterium content in the films averaged D/Li = 15 at %. Irradiation with ultraviolet radiation led to the formation of additional low-temperature desorption peaks ($T \sim 500$ K), as well as to the disappearance of high-temperature peaks ($T > 700$ K) or to their shift to a lower-temperature region. In the future, the results obtained may form the basis for methods for detecting the places of predominant accumulation of lithium hydride in tokamaks, as well as facilitating the process of removing tritium from the internal elements of thermonuclear installations.

Keywords: thin films, co-deposition, lithium, deuterium, lithium hydride, ultraviolet radiation