

АНОМАЛЬНО ГЛУБОКОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ ВОДОРОДА В НИОБИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

А. Ю. Дидык

Объединенный институт ядерных исследований

Методом регистрации упругорассеянных ядер отдачи водорода (ERD) изучен процесс накопления и перераспределения водорода при импульсном воздействии высокотемпературной водородной плазмы от установки «Плазменный фокус» — ПФ-4 в сборке из трех ниобиевых фольг высокой чистоты. Установлено, что по мере увеличения числа импульсов водородной плазмы происходит перераспределение имплантированного водорода на большие глубины в сборке из ниобиевых фольг, значительно превышающие пробеги ионов водорода (при их максимальной скорости до $\sim 10^8$ см/с). Максимальная концентрация водорода до 60 ат. % при воздействии 20 импульсов водородной плазмы достигается в ближней к ПФ-4 поверхности третьей Nb-фольги. Обнаруженное явление может быть объяснено выносом имплантированного водорода под воздействием мощных ударных волн, образуемых в ниобиевых фольгах от импульсной водородной плазмы, и (или) ускорением диффузии атомов водорода под действием волны сжатия-растяжения на фронте ударной волны с перераспределением водорода на большие глубины. Аналогичное поведение обнаружено в сборках из двух или трех и более фольг из никеля, ванадия, ниобия, тантала различных толщин, включая и сборки фольг из разнородных материалов, которые были также изучены.

The method of elastic recoil detection (ERD) has been used for the study of storage and redistribution processes of hydrogen atoms under the influence of pulse high temperature hydrogen plasma obtained using the «Plasma Focus» PF-4 set-up in three high purity niobium foils. It was established that with an increase of number of PF-4 set-up pulses there occur spreading and transfer of implanted hydrogen atoms to large depths in three Nb-foils which are significantly larger than the projected range of hydrogen ions (with the velocity $\sim 10^8$ cm/s). The maximum hydrogen concentration up to 60 at. % is reached in the nearest to PF-4 surface of the third Nb-foil at 20 impulses of the PF-4 set-up. The observed phenomenon can be described by transfer of implanted hydrogen atoms under the action of powerful shock waves, created by pulse hydrogen plasma and (or) by accelerating hydrogen atom diffusion under the influence of compression-straining wave at the front of the shock wave at redistribution of hydrogen atoms at large depths. Similar behavior was discovered and described also in series of nickel, vanadium, niobium and tantalum foils (two or three foils and more in a series) including series of foils from heterogeneous (different) materials, which were studied, too.

PACS: 52.77.-j

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в связи с успехами в лазерной технике и созданием мощных импульсных лазеров в пико- (10^{-12} с) и фемто- (10^{-15} с) секундных диапазонах значительное развитие получила относительно новая область науки — физика высокой плотности

энергии [1, 2]. Это направление развивалось как по пути исследования воздействия коротких импульсов на конденсированные среды, т. е. с целью изучения таких процессов, как лазерное распыление, абляция, перераспределение примесей, возникновение новых и растворение старых фаз, так и исследования влияния и возникновения мощных ударных волн [3, 4]. Помимо этого сформировалось и другое важное направление исследований по воздействию мощных импульсов лазерного излучения, имеющее целью создание лазерного управляемого ядерного синтеза. В таких процессах осуществляется экстремально высокое энерговыделение в вещество, так как теплопроводность (электронная, лучистая и фононная) не успевает повлиять на охлаждение мишени за время импульсного нагрева. Однако в связи с тем, что длина волны лазера мала, а высокочастотный скин-эффект значительно уменьшает глубину проникновения света в твердое тело, а также и в образующую при этом плотную приповерхностную плазму, здесь имеют место лишь поверхностные эффекты.

Как известно, при работе термоядерных реакторов в материале первой стенки должно происходить накопление компонентов плазмы (дейтерия и трития) и продуктов термоядерных реакций в виде гелия. Поэтому изучение процессов накопления и адсорбции-десорбции легких газов и особенно трития имеет важнейшее значение [3, 4].

Целью настоящей работы является изучение распространения ударных волн в металлических фольгах по эффектам, возможно, обусловленным процессами перераспределения и накопления ионов от импульсной водородной и дейтериевой плазмы. Выбор этих двух типов плазмы обусловлен возможностью регистрации с использованием детектирования упругорассеянных атомов отдачи (elastic recoil detection — ERD) водорода и дейтерия при резерфордском обратном рассеянии (Rutherford backscattering spectrometry — RBS).

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях была использована методика облучения набора фольг из металлов, ВТСП-керамик, металлических сплавов, многослойных структур и полимерных пленок на установке ПФ-4 в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН [3–5].

Применение установок типа «плазменного фокуса» (ПФ) для получения мощных потоков плазмы и изучение ее воздействия на материалы представляется также весьма актуальным с точки зрения возможности моделирования таких процессов. Среди активно работающих установок типа ПФ можно выделить установку ПФ-4 в Физическом институте РАН. Параметры ПФ-4 следующие: энергия конденсаторной батареи — 3,6–4 кДж, максимальный ток ≈ 400 кА, скорость плазменного потока — до 10^8 см/с, плотность плазмы до $\approx 10^{18}$ см⁻³, длительность плазменного импульса 50–100 нс, плотность вносимой в поверхность мишени до $\sim 10^8$ – 10^9 Вт/см², выход нейтронов — до $\sim 10^8$ за импульс дейтериевой плазмы, время между импульсами для частичного охлаждения мишени — не менее 5–6 мин.

В выполненных экспериментах по изучению воздействия высокотемпературной плазмы расстояние от анодной вставки (рис. 1) составляло 35 мм. Для изучения ударных волн использовалась водородная и дейтериевая плазма. При воздействии дейтериевой плазмы на образцы осуществлялось также измерение выхода нейтронов из термоядерной реакции ${}^2\text{D}^{1+} + {}^2\text{D}^{1+}$ с использованием нейтронных детекторов, описанных в [6, 7].

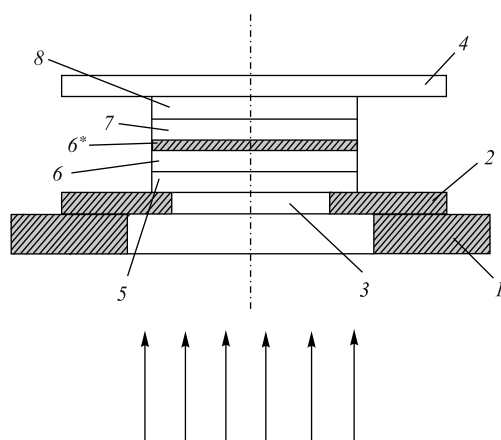


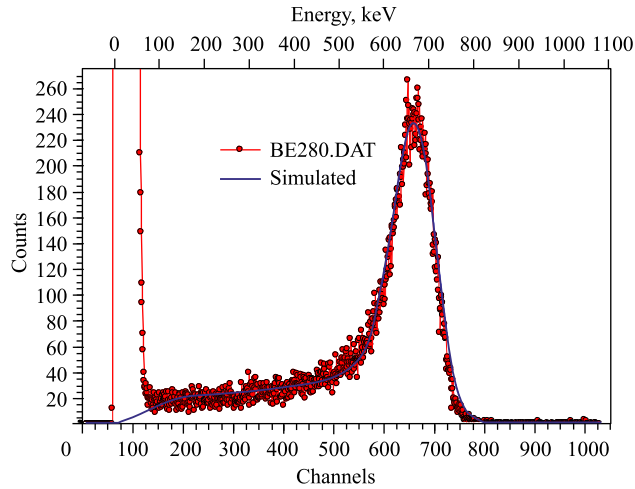
Рис. 1. Сборка Nb-фольг для изучения воздействия импульсов высокотемпературной плазмы на образцы на ПФ-4 [4, 5] (поток снизу): 1 — нижняя часть дискового держателя образцов на четыре сборки из нержавеющей стали X18H10T (НС); 2 — передняя диафрагма с диаметром отверстия 3, равным 10 или 15 мм; 4 — прижимная пластина из НС; 5–8 — набор фольг из одного или различных материалов. 6* означает, что фольга подвергнута с зачерненной стороны некоторой обработке

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Исследование упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия. Образцы фольг из ниобия чистотой 99,9% и с толщиной 110 мкм были облучены на установке ПФ-4 [3–5] в сборке из трех плотно прижатых Nb-фольг двадцатью импульсами водородной плазмы. Разрядная вакуумная камера установки ПФ-4 после работы на дейтериевой плазме была откачана до 10^{-3} Торр, а затем вновь наполнена чистым водородом до рабочего давления от 2 до 3 Торр. Для снижения нагрева мишени периодичность следования импульсов ПФ-4 превышала 5–6 мин. При этом выхода нейтронов из водородной плазмы, естественно, не наблюдалось [6, 7], а уровень нейтронного фона для обоих детекторов составлял примерно 30–40 импульсов за 10 с. Для удобства введем символическое обозначение такой Nb-сборки фольг в виде ${}^1\text{Nb-1}^2 | {}^1\text{Nb-2}^2 | {}^1\text{Nb-3}^2$.

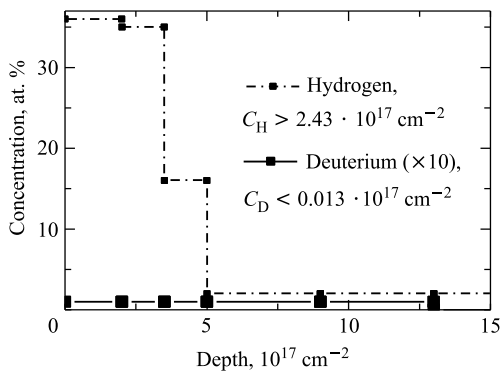
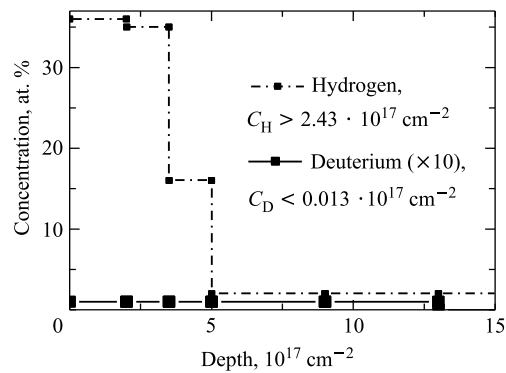
На рис. 2 представлен спектр ERD для упругорассеянных ядер водорода (протонов) и, возможно, дейтерия (дейтронов) от передней к ПФ-4 поверхности третьей Nb-фольги в сборке. Спектр соответствует ближней к ПФ-4 поверхности третьей Nb-фольги с максимальной измеренной интегральной концентрацией водорода от воздействия 20 импульсов водородной плазмы.

Ввиду того, что до исследования данной серии Nb-образцов установка ПФ-4 работала на дейтерии, и в поверхности всех внутренних элементов разрядной камеры мог накопиться дейтерий, расчеты проводились и для упругорассеянных ионов дейтерия. Ясно также, что в образцах фольг из ниобия также присутствовал водород в качестве технологической примеси, поэтому исходная концентрация водорода была измерена в исходной фольге из ниобия перед воздействием импульсов водородной плазмы (см. также заключение). Т. е. этот спектр соответствует фольге ${}^1\text{Nb-3}$ в обозначениях, введенных выше.

Рис. 2. Спектр ядер отдачи водорода и дейтерия с поверхности ^1Nb -3-фольги

Все ERD-спектры были получены с использованием анализирующего пучка ионов гелия с энергией 2,3 МэВ при скользящем угле падения на образец в 15° на электростатическом генераторе ЭГ-5 Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ [8, 9]. Обработка спектров была проведена с применением стандартной программы SIMNRA 6.05. Как видно, число импульсов в области от 800 до 1000 каналов составляет только 1 импульс при значении в максимуме ~ 260 отсчетов. Можно сделать вывод, что эта часть спектра соответствует уровню фона.

Измерение спектров ERD было выполнено на обеих сторонах каждой из трех Nb-фольг в сборке ^1Nb - 1^2 | ^1Nb - 2^2 | ^1Nb - 3^2 . Измеренные распределения атомов водорода и дейтерия по глубине и оценочные значения их интегральных концентраций (C_H и C_D в единицах атом/см 2) представлены попарно для ближней и дальней к аноду сторон установки ПФ-4 для каждой из трех фольг на рис. 3 и 4, рис. 5 и 6 и рис. 7 и 8 соответственно. Расчетное распределение на рис. 7 соответствует спектру на рис. 2.

Рис. 3. Распределение водорода и дейтерия в ^1Nb -1-фольгеРис. 4. Распределение водорода и дейтерия в Nb- 1^2 -фольге

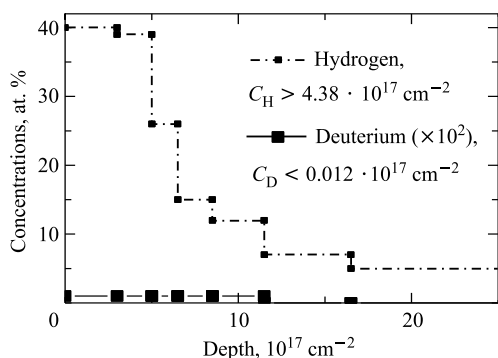


Рис. 5. Распределение водорода и дейтерия в ¹Nb-2-фольге

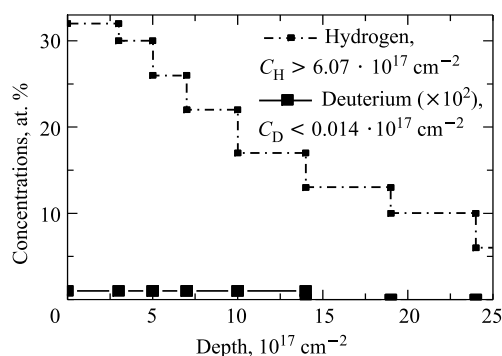


Рис. 6. Распределение водорода и дейтерия в Nb-2²-фольге

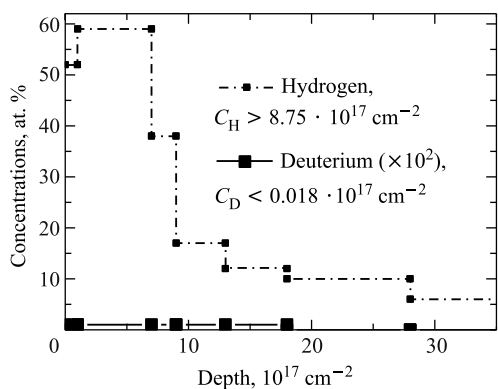


Рис. 7. Распределение водорода и дейтерия в ¹Nb-3-фольге

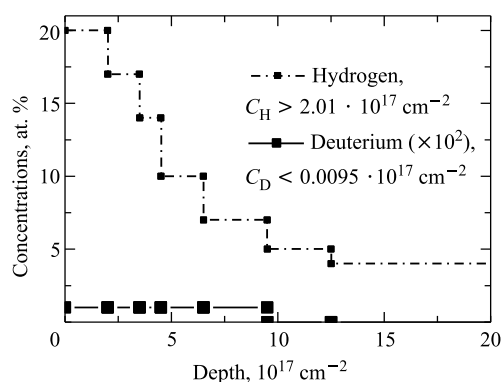


Рис. 8. Распределение водорода и дейтерия в Nb-3²-фольге

Как видно, концентрация дейтерия такова, что ее можно считать систематической ошибкой измерений и фоном.

Правая крайняя точка на графике с $n_H = 2,01 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ также превышает исходную поверхностную концентрацию водорода в Nb-фольгах. При максимальной интегральной концентрации водорода для первой поверхности третьей фольги ¹Nb-3 ($8,75 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) относительная концентрация водорода в металлическом гидриде ниобия составляет 58 %, т. е. гидрид можно описать на этих глубинах формулой Nb₁H_{1,5}

2.2. Рентгеноструктурный анализ. Следует отметить, что измерение концентрации в Nb-фольгах водорода и дейтерия методом ERD было проведено через один год после воздействия на них двадцатью импульсами высокотемпературной дейтериевой плазмы. Это было сделано специально с тем, чтобы проверить наличие или отсутствие процессов десорбции водорода в течение длительного времени «выдерживания». Как показали измерения, десорбция водорода отсутствует в пределах точности выполненных измерений при применении метода ERD. Для определения состояния, в котором находился и находится водород, были выполнены рентгеноструктурные исследования также с двух сторон всех трех фольг из сборки ¹Nb-1²|¹Nb-2²|¹Nb-3². Исследования однозначно показали, что во всех трех фольгах присутствуют фазы, соответствующие гидриду ниобия — NbH.

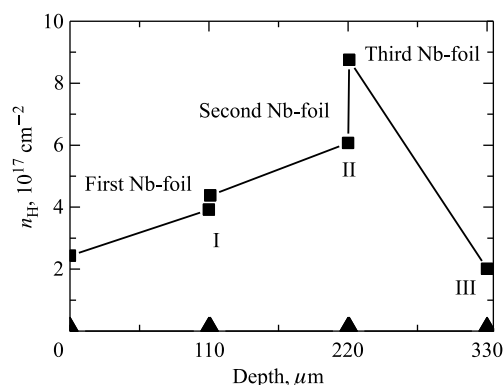


Рис. 9. Распределение интегральных концентраций водорода с обеих сторон Nb-фольг в зависимости от номера фольги или от глубины в сборке из трех фольг

Объемная доля гидридной ниобия фазы находится в согласии с оценочными значениями, сделанными по методу ERD-анализа (см. рис. 3–8).

На рис. 9 представлены сводные результаты по измерению методом ERD интегральных концентраций водорода. Оценочные значения интегральных концентраций соединены прямыми линиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных исследованиях был применен простой метод определения концентрации легких примесей водорода в сборках из Nb-фольг с толщиной по 110 мкм каждая.

Установлено, что по мере увеличения числа импульсов водородной плазмы при использовании установки ПФ-4 происходит перенос имплантированного водорода на большие глубины (см. рис. 9), значительно превышающие пробеги ионов дейтерия со скоростями порядка 10^8 см/с [10–14]. При этом максимальная концентрация до 60 ат. % (при 20 импульсах высокотемпературной плазмы на ПФ-4) достигается с ближней стороны третьей фольги, т.е. в обозначениях данной работы с ^1Nb -3-фольги (см. также [11–14]).

Рентгеноструктурным анализом показано, что в фольгах из ниобия образуется гидридная фаза NbH, относительная объемная доля этой фазы, в принципе, согласуется с измеренными значениями интегральных концентраций водорода в ниобиевых фольгах.

Необходимо отметить, что при накоплении водорода в поверхностных слоях металлов происходит окрашивание поверхности при достаточно высоких концентрациях водорода и его изотопов (см., например, [15]). Как хорошо видно, с применением оптической микроскопии на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ в максимальном насыщенном водородом или дейтерием слое металла наблюдается окрашивание, цвет которого различен для разных металлов. Например, палладий окрашивается в синий цвет, а ванадий — в золотистый (см. также [16–18]). При том диаметр окрашенного круга (10 или 15 мм) в точности соответствует диаметру входной диафрагмы в сборке из фольг (рис. 1, поз. 3). Этот факт свидетельствует о том, что попадание плазменных потоков непосредственно с краев сборки исключалось. Помимо этого в работе [10] было изучено перераспределение водорода и дейтерия при воздействии 20 импульсов высоко-

температурной водородной плазмы на сборку их трех фольг, куда входят: а) передняя ближняя к аноду ПФ-4 Nb-фольга (с толщиной 110 мкм), б) промежуточная фольга из дейтерированного полиэтилена $(CD_2)_n$ (с толщиной 210 мкм) и в) последняя Nb-фольга (с толщиной 110 мкм), прижатая плотно к передней диафрагме фольг (рис. 1, поз. 3). Установлено, что происходит накопление водорода в фольге *в* до 45 ат. % с одной стороны фольги и до 41 ат. % с другой. При этом обнаружен «вынос» дейтерия из фольги *б* в объем и на поверхность фольги *в* из ниобия. Несмотря на низкую температуру размягчения (120–125 °С) и температуру плавления (125–132 °С) для обычного $(CH_2)_n$ и близких соответствующих температур для дейтерированного полиэтилена $(CD_2)_n$, температурной деформации и разрушения образца, расположенного между двумя Nb-фольгами, не наблюдается.

В энциклопедии [3, с. 375] представлены результаты, полученные при изучении воздействия высокотемпературной дейтериевой плазмы на накопление дейтерия в поверхностном слое образцов из нержавеющей стали (25Cr12MnMo20W) и чистого вольфрама (W) в зависимости от числа импульсов. Сделан вывод, что по мере увеличения числа импульсов дейтериевой плазмы происходит образование «развитой» поверхности, т. е. поверхность превращается из 2-мерной в 3-мерную, с которой эффективно происходит десорбция имплантированного дейтерия. Похожий эффект имеет место и с образцами ниобия в представленных экспериментальных результатах. Концентрация водорода в первом слое не увеличивается, достигая при 20 импульсах водородной плазмы интегрального значения $C_H > 2,46 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, которое лишь незначительно превышает исходную поверхностную концентрацию ($\sim C_H > 2,01 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$).

Измерения концентрации водорода по глубине и интегральная концентрация водорода в приповерхностном слое ведут себя иначе, чем в работе [3]. Как видно, происходит накопление имплантированного водорода, а возможно, и вынос водорода, который присутствует в ниобии в качестве технологической примеси, на большие глубины в сборке из фольг по мере увеличения числа импульсов высокотемпературной водородной плазмы [10–14].

Обнаруженное явление сверхглубокого проникновения водорода, а также и дейтерия ([10–14]), предположительно, может быть объяснено воздействием мощных ударных волн [1–5, 19–24] на перераспределение водорода с выносом его как легкой и слабо-связанной примеси на большие глубины. Можно привести далекую аналогию: движение водорода можно сравнить с тем, как высокая приливная волна выносит серфингиста (surfing) на большие расстояния на своем гребне. Но данный подход требует всестороннего развития соответствующего модельного подхода и его детального рассмотрения. В качестве другого, более разработанного подхода можно выделить традиционный подход, основанный на ускоренной диффузии примесей при наличии внешних движущих сил F (см. монографию [10]). В соответствии с этим подходом, законы Фика для потока частиц следует представить в виде ([25, с. 11] и [26, с. 300]):

$$\vec{J} = -D \cdot \vec{\nabla} C(\vec{R}) + K \cdot \langle \vec{V} \rangle_F, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C(\vec{R})}{\partial t} = \nabla [D \cdot \vec{\nabla} C(\vec{R})] - K \cdot \nabla \langle \vec{V} \rangle_F, \quad (2)$$

где внешняя движущая сила F придает каждому атому среднюю дополнительную скорость $\langle \vec{V} \rangle_F$, K — коэффициент пропорциональности. Средняя дополнительная скорость

каждого атома $\langle \bar{V} \rangle_F$, предположительно, может быть сопоставлена со скоростью распространения ударной волны, которая, как известно, превышает скорость распространения звука в материале в несколько раз [1–6, 23, 24]. Как известно, при мощном импульсном воздействии вначале в материале распространяется упругая волна, которая на определенной глубине R_{E-S} , зависящей от материала и плотности мощности импульса на поверхности, трансформируется в ударную волну с крутым передним фронтом — волну сжатия и волну растяжения за фронтом ударной волны. Поэтому на относительно небольших глубинах $R < R_{E-S}$ в качестве дополнительной скорости легкого не связанного химической связью и (или) слабо связанного примесного атома $\langle \bar{V} \rangle_F$, возможно, следует выбирать скорость объемной продольной $V_{||}$ или поперечной V_{\perp} упругих волн.

Аналогичное поведение с аномальным перераспределением обнаружено и в сборках фольг (по две, три в сборке) из ванадия, ниобия и тантала, включая и фольги из разнородных различных материалов, которые были также изучены.

Касательноборок из однородных (данная работа и [11–14]) или разнородных [10] фольг, в которых также наблюдается вынос водорода и дейтерия (для дейтериевой плазмы) на значительные глубины, применение выражений (1) и (2) следует принимать во внимание с учетом возникновения на границе раздела металл–газ–металл и т. д. отраженной волны и ее суперпозиции с падающей волной, а также и изменение скорости распространения волн в зависимости от состава слоя.

Представляется важным и перспективным проведение более детальных исследований по выяснению особенностей обнаруженного явления. Помимо этого следует рассмотреть как теоретические аспекты по влиянию ударных волн на «ударно-волновую диффузию» легких примесей в металлах, так и подход, основанный на ускоренной диффузии примесей при наличии внешних движущих сил. Как видно, в вышеописанном виде данные подходы сближаются.

Можно привести следующие оценки. Скорость звука в металлах превышает $V \geq 2,0 \cdot 10^5$ см/с, длительность действия импульса высокотемпературной плазмы — порядка 50–100 нс, т. е. это время составляет $t = (0,5–1,0) \cdot 10^{-7}$ с, следовательно, максимальная глубина выноса легких примесей водорода и дейтерия может превышать значение $R \approx Vt > 100–200$ мкм. Оценочное значение глубины проникновения водорода находится в хорошем согласии по порядку величины с экспериментальными значениями [10–14].

Представляется важным провести детальные исследования и уточнить результаты экспериментов по образованию гидридных фаз в наборе фольг при воздействии импульсной высокотемпературной водородной плазмы с применением рентгеноструктурного анализа и с малоугловым рассеянием синхротронного излучения.

Автор работы выражает сердечную благодарность В. Я. Никулину за предоставленную возможность провести импульсную плазменную обработку материалов на установке «Плазменный фокус» — ПФ-4 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортон В. Е. Экстремальные состояния вещества на земле и в космосе. М.: Физматлит, 2008. 264 с.
2. Фортон В. Е. Экстремальные состояния вещества. М.: Физматлит, 2010. 304 с.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, банки данных. Т. IX-3 / Под ред. В. А. Грибкова. М.: ЯНУС-К, 2007. 591 с.

4. Иванов Л. И., Пименов В. Н., Грибков В. А. Взаимодействие мощных импульсных потоков энергии с материалами // Физика и химия обработки материалов. 2009. № 1. С. 23–37.
5. Антонова Л. Х. и др. Воздействие ударных волн на токонесущие свойства ВТСП-ленты YBCO(123) // Докл. РАН. 2009. Т. 428, № 4. С. 471–473.
6. Волобуев И. В. и др. Детекторы для нейтронов из короткоживущей плазмы // Тр. ФИАН. М.: Наука, 1977. Т. 94. С. 21–28.
7. Волобуев И. В. и др. Исследование пространственной анизотропии нейтронного излучения на установках плазменный фокус // Краткие сообщ. по физике ФИАН. М., 1987. № 11. С. 32–34.
8. Hrubčín L. et al. Application of the ERD Method for Hydrogen Determination in Silicon (Oxy)Nitride Thin Films Prepared by ECR Plasma Deposition // Nucl. Instr. Meth. B. 1994. V. 85. P. 60–62.
9. Кобзев А. П. Элементный анализ наноструктур на пучках заряженных частиц // Ядерная физика и нанотехнологии. Ядерно-физические аспекты формирования, изучения и применения наноструктур: Сб. ст. / Под ред. А. Н. Сисакяна. Дубна, 2008. С. 142–154.
10. Дидык А. Ю. Аномально глубокое проникновение водорода и дейтерия в ниобий в сборке из Nb-фольг и дейтерированного полиэтилена $(CD_2)_n$ под действием импульсной высокотемпературной водородной плазмы. Препринт ОИЯИ Р14-2011-87. Дубна, 2011. 14 с.
11. Боровицкая И. В. и др. Проникновение ионов дейтерия и перераспределение атомов водорода по глубине в металлических фольгах при воздействии импульсов плазменного фокуса ПФ-4 // Тез. докл. ХLI междунар. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, МГУ, Москва, 31 мая – 2 июня 2011 г. М., 2011. С. 116.
12. Боровицкая И. В. и др. Перераспределение имплантированного дейтерия из фольг при воздействии импульсов плазменного фокуса ПФ-4 // Там же. С. 117.
13. Дидык А. Ю. Накопление дейтерия и водорода в Ni-фольгах при воздействии высокотемпературной плазмы // Материалы XVIII научно-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Судак, Крым, Украина, 15–24 сент. 2011 г. С. 2–85.
14. Дидык А. Ю. Перераспределение имплантированного дейтерия и водорода в Ni-фольгах при воздействии высокотемпературной плазмы // Материалы XXI Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, Крым, Украина, 22–27 авг. 2011 г. С. 15–19.
15. Den Broeder F. J. A. et al. Visualization of Hydrogen Migration in Solids Using Switchable Mirrors // Nature. 1998. V. 394. P. 656–658.
16. Didyk A. Yu. et al. Depth Concentrations of Deuterium Ions Implanted into Some Pure Metals and Alloys. JINR Preprint E14-2011-6. Dubna, 2011. 12 p.; Part. Nucl., Lett. (submitted).
17. Didyk A. Yu. et al. Comparative Analysis of Deuterium Ions Implanted or Deuterium Atoms Saturated at High Pressure Behavior in Pure Pd and Pd Diluted Alloys. JINR Preprint E14-2011-7. Dubna, 2011. 22 p.; Part. Nucl., Lett. (submitted).
18. Didyk A. Yu. et al. ERD Studies of D-Ion Depth Distributions after Its Implantation at Some Pure Metals and Alloys. JINR Preprint E14-2011-8. Dubna, 2011. 18 p.; Part. Nucl., Lett. (submitted).
19. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 1963. 632 с.
20. Великович А. Л., Либерман М. А. Физика ударных волн в газах и плазме. М.: Наука, 1987. 295 с.
21. Блейзер Г. А., Кривобоков В. П., Пащенко О. В. Теплоперенос в твердом теле при воздействии мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука; Сиб. изд-во РАН, 1999. 176 с.
22. Мамонтов А. П., Чернов И. П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. 286 с.

426 *Дидык А. Ю.*

23. *Сархадов И., Дидык А. Ю., Пузынин И. В.* Динамическое описание ударных волн в материалах при импульсных воздействиях // Материалы XVIII научно-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Судак, Крым, Украина, 15–24 сент. 2011 г. С. 76–79.
24. *Сархадов И., Дидык А. Ю., Пузынин И. В.* Ударные волны в конденсированных средах и их описание с использованием гидродинамических уравнений // Материалы XXI Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, Крым, Украина, 22–27 авг. 2011 г. С. 115–119.
25. *Бокштейн Б. С.* Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
26. *Жирифалько Л.* Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975. 382 с.

Получено 9 августа 2011 г.