

## **АНОМАЛЬНО ГЛУБОКОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ В СБОРКЕ ИЗ Nb-ФОЛЬГ И ДЕЙТЕРИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub> ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ**

*А. Ю. Дидык*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Методом регистрации упругорассеянных ядер отдачи водорода (ERD) изучен процесс накопления и перераспределения водорода при импульсном воздействии высокотемпературной водородной плазмы установки «Плазменный фокус» — ПФ-4 в сборке из двух ниобиевых фольг высокой чистоты и расположенной между ними пленки из дейтерированного полиэтилена. Установлено, что по мере увеличения числа импульсов водородной плазмы происходит перераспределение имплантированного водорода на большие глубины в сборке из двух ниобиевых фольг и дейтерированного полиэтилена, значительно превышающие пробеги ионов водорода (при их максимальной скорости до  $\sim 10^8$  см/с). Максимальная концентрация водорода до 45 ат. % при воздействии 20 импульсов водородной плазмы достигается в ближней к ПФ-4 поверхности второй Nb-фольги. Рентгеноструктурные исследования фольг из ниобия позволили установить наличие в них гидридных фаз ниобия. Обнаружено перераспределение дейтерия из дейтерированного полиэтилена в приповерхностный слой и объем второй Nb-фольги. Обнаруженное явление может быть объяснено выносом имплантированного водорода через сборку из фольг и выносом дейтерия из дейтерированного полиэтилена в приповерхностный слой второй фольги под воздействием мощных ударных волн, образуемых в сборке, а также ускорением диффузии водорода и дейтерия в поле напряжений от ударной волны.

The studies 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 multilayered structure (sandwich) consisting of two high purity niobium foils and deuterium polyethylene film pressed between them have been carried out by the method of elastic recoil detection (ERD). It was established that with an increased number of PF-4 set-up pulses there occurs spreading and transfer of implanted hydrogen atoms to large depths in two 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 45 at. % is reached in the nearest to PF-4 surface of the second Nb-foil at 20 impulses of the PF-4 set-up. Roentgen studies allowed us to establish the presence of niobium hydride phase in both Nb-foils. It was observed that the redistribution and spreading of deuterium atoms from the bound state in deuterium polyethylene near the surface layer and bulk material of the second Nb-foil took place, too. 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 by accelerating hydrogen atom diffusion under the influence of compression-straining wave at the front of the shock wave and redistribution of hydrogen and deuterium atoms at large depths.

---

<sup>1</sup>E-mail: didyk@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования воздействия мощных нано-, пико- и фемтосекундных плазменных импульсов и ударных волн, создаваемых различными источниками и различной природы, имеют важнейшее значение как для развития фундаментальных представлений в физике твердого тела, гидродинамике, газодинамике и высокотемпературной плазме, так и для научно-технического и технологического применения [1–7].

Цель представленной работы — изучение влияния импульсного воздействия высокотемпературной водородной плазмы, обнаруживающегося в виде ударных волн и потока ионов водорода высокой плотности, на процессы накопления имплантированного водорода и перераспределения его в сборку из разнородных фольг. Сборка представляет собой фольгу из дейтерированного полиэтилена  $(CD_2)_n$  с толщиной 210 мкм, плотно зажатую между двумя фольгами из ниобия (с толщинами по 110 мкм каждая). Помимо сформулированной выше цели также представляло интерес изучение особенностей процесса возможного «выноса» химически связанных атомов дейтерия из дейтерированного полиэтилена  $(CD_2)_n$  под действием мощных ударных волн на установке «Плазменный фокус» — ПФ-4 [3, 7–10].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Воздействие высокотемпературной плазмы на образцы осуществлялось на установке «Плазменный фокус» — ПФ-4 в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН. Параметры ПФ-4 следующие [3, 7–9]: энергия конденсаторной батареи — 3,6–4 кДж, максимальный ток  $\approx 400$  кА, скорость плазменного потока — до  $\sim 10^8$  см/с, плотность плазмы — до  $\sim 10^{18}$  см $^{-3}$ , длительность плазменного импульса — 50–100 нс, плотность вносимой в поверхность мишени — до  $\sim 10^8$ – $10^9$  Вт/см $^2$ , выход нейтронов — до  $\sim 10^8$  за импульс дейтериевой плазмы. Время между импульсами для частичного охлаждения мишени после очередного импульса плазмы составляло не менее 5–6 мин. Давление водорода в камере при работе установки ПФ-4 было в интервале 2–4 Торр.

В выполненных экспериментах по изучению воздействия высокотемпературной плазмы расстояние от анодной вставки до поверхности мишени было выбрано равным 35 мм. Для изучения ударных волн использовалась водородная и дейтериевая плазма. При воздействии и водородной, и дейтериевой плазмы на образцы осуществлялось также измерение выхода нейтронов из термоядерной реакции  ${}^2D^{1+} + {}^2D^{1+}$  с использованием нейтронных детекторов, описанных в [10] для контроля.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**2.1. Исследование упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия.** Исследования воздействия импульсов ПФ-4 проводилось для мишени, представляющей собой две фольги из ниобия толщиной 110 мкм с расположенным между ними образцом дейтерированного полиэтилена  $(CD_2)_n$ . Схема расположения образцов в сборке приведена на

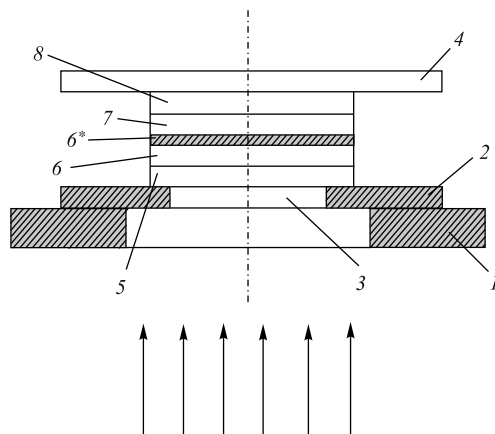


Рис. 1. Сборка Nb-фольг для изучения воздействия импульсов высокотемпературной плазмы на образцы на ПФ-4 [3, 7–9] (поток снизу). 1 — нижняя часть дискового держателя образцов на четыре сборки из нержавеющей стали X18H10T (НС); 2 — передняя диафрагма с диаметром отверстия 3, равным 10 или 15 мм; 4 — прижимная пластина из НС, а 5–8 — набор фольг из одного или различных материалов. Символ 6\* означает, что фольга подвергнута с зачерненной стороны некоторой обработке

рис. 1, где позиции 5–7 — это Nb-фольги, а 6 — дейтерированный полиэтилен. Схематически расположение образцов можно представить для удобства описания результатов как  ${}^1\text{Nb}-1^2|\text{CD}_2|{}^1\text{Nb}-2^2$ .

Воздействие ПФ-4 на сборку  ${}^1\text{Nb}-1^2|\text{CD}_2|{}^1\text{Nb}-2^2$  составило 20 импульсов водородной плазмы. Структура и внешний вид пленки из дейтерированного полиэтилена  $(\text{CD}_2)_n$ , плотно зажатой в обкладках, т. е. между двумя фольгами из ниобия (99,9%), не претерпела заметных изменений, несмотря на то, что соответствующие температуры размягчения и плавления для обычного полиэтилена —  $(\text{CH}_2)_n$  составляют 120–125 °С и 125–132 °С соответственно. А на второй фольге из ниобия, на ее ближней стороне к ПФ-4 и с обратной стороны, т. е.  ${}^1\text{Nb}-2$  и  $\text{Nb}-2^2$ , четко обрисовались два цветовых пятна с диаметром в 10 мм, что в точности соответствует входной диафрагме на рис. 1, поз. 3. При этом возможность попадания на эти две стороны первой ниобиевой фольги водорода исключалась, так как с одной стороны к ней была прижата пленка из дейтерированного полиэтилена, а с другой стороны плотно прижата прижимная пластина из нержавеющей стали (рис. 1, поз. 4).

Следует отметить, что эффект окрашивания металлических фольг при достаточно высокой концентрации водорода и его изотопов известен и описан в пионерской работе [11].

Для измерения упругорассеянных ядер (ERD-метод) отдачи водорода и дейтерия использовались специализированные каналы на ускорителях ЭГ-5 Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ и в Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова.

Ионы гелия с энергиями 2,3 и 1,9 МэВ были использованы в ERD при скользящем падении ионов гелия в 15° и угле регистрации в 30° [12, 13].

На рис. 2 и 3 представлены спектр ERD для образца  ${}^1\text{Nb-1}$  и соответствующие данному спектру концентрационные зависимости распределения водорода и дейтерия в первой фольге из ниобия, сильно распыленной и вогнутой. Все расчетные концентрации водорода и дейтерия и интегральные концентрации  $C_{\text{H}}$  и  $C_{\text{D}}$  на всех рисунках получены с использованием программы SIMNRA 6.05.

Из формы ERD-спектра (рис. 2 и 3) видно, что распределение водорода по глубине в первой Nb-фольге значительно превышает проективный пробег ионов гелия при ERD-анализе. Как видно, оценочная концентрация ионов дейтерия — на уровне фона.

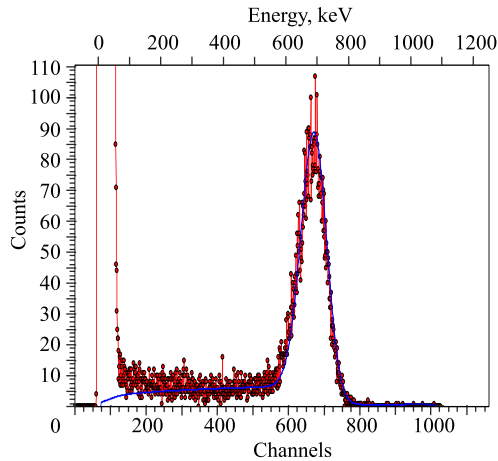


Рис. 2. Спектр упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия из приповерхностного слоя  ${}^1\text{Nb-1}$ -фольги

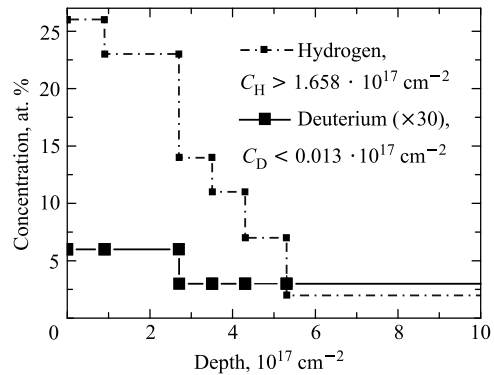


Рис. 3. Распределение водорода и дейтерия в приповерхностном слое  ${}^1\text{Nb-1}$ -фольги

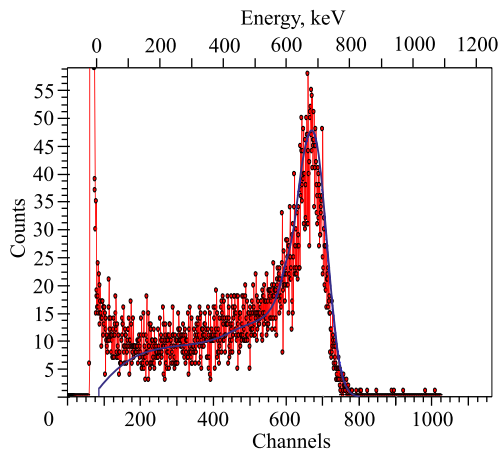


Рис. 4. Спектр упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия из приповерхностного слоя Nb-1<sup>2</sup>-фольги

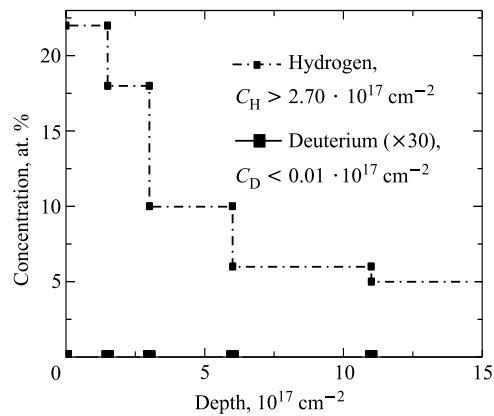


Рис. 5. Распределение водорода и дейтерия в приповерхностном слое Nb-1<sup>2</sup>-фольги

На рис. 4 и 5 представлены спектр ERD для образца Nb-1<sup>2</sup> и концентрационные зависимости распределения водорода и дейтерия с обратной выпуклой поверхности первой фольги из ниобия — Nb-1<sup>2</sup>.

Видно, что концентрация водорода выросла более чем вдвое с обратной стороны первой Nb-фольги, его распределение уходит в глубь фольги, а концентрация дейтерия пренебрежимо мала.

Для проверки качества пленки из дейтерированного полиэтилена (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub> и обычного полиэтилена (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub> вместе со стандартным дейтеридом ванадия VD<sub>0,8</sub> были измерены также и спектры для этих образцов на ионах гелия с энергией 1,9 МэВ. На рис. 6 представлен спектр ERD образца дейтерированного полиэтилена (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, обычного полиэтилена (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub> и гидроида ванадия VD<sub>0,8</sub>.

На рис. 7 и 8 представлены спектр ERD для образца <sup>1</sup>Nb-2 и концентрационные зависимости распределений водорода и дейтерия с передней вогнутой поверхности второй фольги из ниобия — <sup>1</sup>Nb-2.

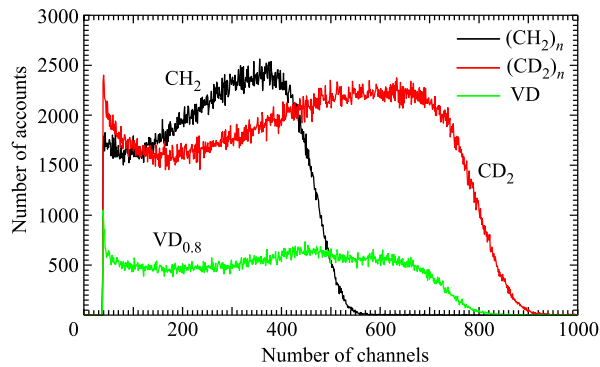


Рис. 6. Спектры упругорассеянных ядер для калибровочных образцов: (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub> и VD<sub>0,8</sub>

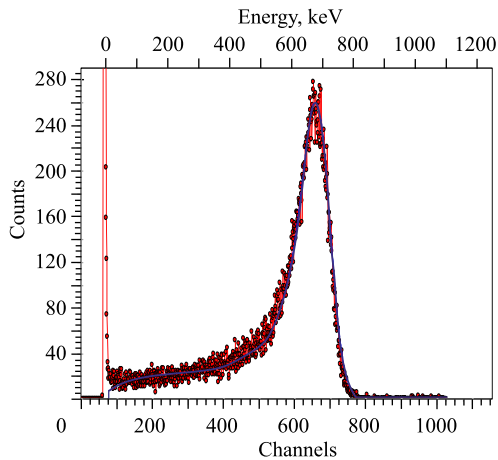


Рис. 7. Спектр упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия из приповерхностного слоя <sup>1</sup>Nb-2-фольги

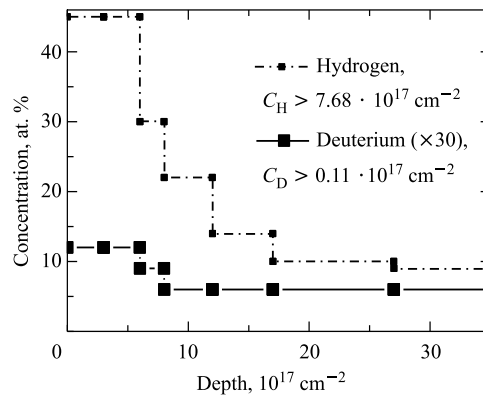


Рис. 8. Распределение водорода и дейтерия в приповерхностном слое <sup>1</sup>Nb-2-фольги

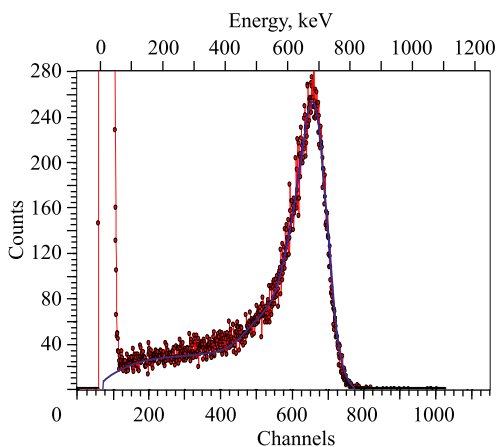


Рис. 9. Спектр упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия из приповерхностного слоя Nb-2<sup>2</sup>-фольги

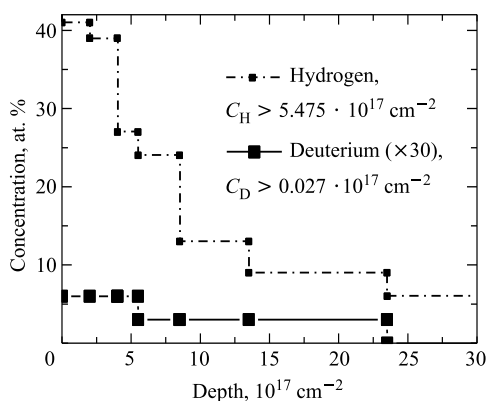


Рис. 10. Распределение водорода и дейтерия в приповерхностном слое Nb-2<sup>2</sup>-фольги

Видно, что концентрация водорода в ближней к ПФ-4 стороне <sup>1</sup>Nb-2-фольги достигает 45 ат. %. При этом водород и дейтерий распространяются на значительные глубины, заметно превышающие пробег ионов гелия и глубину слоя, из которого возможен вылет упругорассеянных ионов водорода и дейтерия. Как видно, оценочная интегральная концентрация ионов дейтерия  $C_D > 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Это означает, что химически связанные ионы дейтерия из дейтерированного полиэтилена  $(CD_2)_n$ , по-видимому, вынесены ударными волнами при воздействии высокотемпературной водородной плазмы [4, 5] и остановились в приповерхностном слое второй Nb-фольги, т. е. <sup>1</sup>Nb-2-фольги.

На рис. 9 и 10 представлены спектр ERD для образца Nb-2<sup>2</sup> и концентрационные зависимости распределений водорода и дейтерия с задней вогнутой поверхности второй фольги из ниобия — Nb-2<sup>2</sup>.

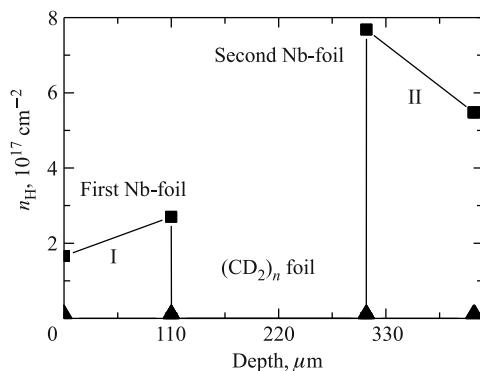


Рис. 11. Распределение интегральных концентраций водорода с обеих сторон двух Nb-фольг в зависимости от номера фольги или от глубины в сборке из двух фольг, между которыми была фольга из дейтерированного полиэтилена  $(CD_2)_n$

Концентрация водорода в дальней от ПФ-4 стороне Nb-2<sup>2</sup>-фольги достигает 41 ат. %, а концентрация уходит на значительные глубины, также заметно превышающие пробег ионов гелия и глубину слоя, из которого возможен вылет упругорассеянных ионов водорода и дейтерия. Концентрация дейтерия с этой стороны фольги мала.

На рис. 11 представлены сводные результаты по измерению методом ERD интегральных концентраций водорода. Оценочные значения интегральных концентраций соединены прямыми линиями.

**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 20 импульсами высокотемпературной водородной плазмы. Это было сделано специально с тем, чтобы проверить наличие или отсутствие процессов десорбции водорода в течение длительного времени «вылеживания». 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 двух сторон двух фольг из сборки Nb-1 и Nb-2. Исследования однозначно показали, что в обеих фольгах присутствует фаза, соответствующая гидриду ниобия (NbH) — основная фаза и дигидриду ниобия (NbH<sub>2</sub>) — на уровне фона. При этом объемная доля фазы гидрида ниобия находится в согласии с оценочными значениями, сделанными по методу ERD-анализа (рис. 3, 5, 8 и 10).

### 3. ВЫВОДЫ

Установлено, что по мере увеличения числа импульсов водородной плазмы при использовании установки ПФ-4 происходит перенос имплантированного водорода на большие глубины (см. рис. 10), значительно превышающие пробеги ионов водорода со скоростями порядка 10<sup>8</sup> см/с [3–5]. При этом максимальная концентрация до 45 ат. % (при 20 импульсах высокотемпературной плазмы на ПФ-4) достигается на ближней стороне второй фольги, т. е. в обозначениях данной работы <sup>1</sup>Nb-2-фольги (см. также [9, 14–17]).

Несмотря на низкую температуру размягчения (120–125 °С) и температуру плавления (125–132 °С) для обычного — (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub> и близких соответствующих температур для дейтерированного полиэтилена (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, температурной деформации и разрушения образца, расположенного между двумя Nb-фольгами, *не наблюдается*.

С помощью рентгеноструктурного анализа 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. основополагающую работу [13]). Как хорошо видно, с применением оптической микроскопии на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ в максимально насыщенном водородом или дейтерием слое металла наблюдается окрашивание, цвет которого различен для разных металлов. Например, палладий окрашивается в синий цвет, а ванадий — в золотистый [18–20].

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.

Обнаруженное явление сверхглубокого проникновения водорода, а также и дейтерия (см. [9, 14–17]), предположительно, может быть объяснено воздействием мощных ударных волн [1–9, 21–23] 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 на большие расстояния на своем гребне.

Но «аналогия не есть доказательство», поэтому данный подход требует соответствующего развития, детального рассмотрения и доказательства.

Другой известный подход — более традиционный, но менее известный — основан на ускоренной диффузии примесей при наличии внешних движущих сил  $\vec{F}(\alpha)$  (см. монографию [23, с. 11]), где  $\alpha_i$  — параметры приложенных внешних сил. Тогда законы Фика для потока частиц следует представить в виде (см. [23, с. 11] и [24, с. 300]):

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

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

где внешняя движущая сила  $\vec{F}(\alpha)$  придает каждому диффундирующему атому среднюю дополнительную скорость  $\langle \vec{V} \rangle_F$ , а  $K$  — коэффициент пропорциональности. Средняя дополнительная скорость каждого атома  $\langle \vec{V} \rangle_F$ , предположительно, может быть сопоставлена со скоростью распространения ударной волны, которая, как известно, превышает скорость распространения звука в материале в несколько раз [1–9, 19, 22]. 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 в химическую связь и (или) слабо связанного примесного атома  $\langle \vec{V} \rangle_F$ , 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.

Применение выражений (1) и (2) для интерпретации и оценок следует осуществлять, принимая во внимание учет возникновения на границе раздела металл–газ–металл–газ–металл и т. д. проходящей и отраженной волн, их суперпозицию, а также и изменение скорости распространения волн в зависимости от химического состава слоя.

Можно привести следующие оценки. Скорость звука в металлах, как хорошо известно [25], превышает  $V \geq 2,0 \cdot 10^5$  см/с. Пусть длительность действия импульса высокотемпературной плазмы порядка  $t = (0,5-1,0) \cdot 10^{-7}$  с, следовательно, максимальная глубина выноса легких примесей водорода и дейтерия может превышать значение

$$R \approx Vt > 100-200 \text{ мкм.}$$



Оценочное значение глубины проникновения водорода и дейтерия находится в согласии по порядку с глубинами, ниобия на которых наблюдается водород и дейтерий в металлах, т. е. с экспериментальными данными [9, 14–17].

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. *Фортв В. Е.* Экстремальные состояния вещества на земле и в космосе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 264 с.
2. *Фортв 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. *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1963. 632 с.
5. *Великович А. Л., Либерман М. А.* Физика ударных волн в газах и плазме. М.: Наука, 1987. 295 с.
6. *Блейзер Г. А., Кривококов В. П., Пащенко О. В.* Тепломассоперенос в твердом теле при воздействии мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука; Сиб. изд-во РАН, 1999. 176 с.
7. *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.
8. *Антонова Л. Х. и др.* Воздействие ударных волн на токонесущие свойства ВТСП-ленты YBCO(123) // Докл. АН. 2009. Т. 428, № 4. С. 471–473.
9. *Дидык А. Ю.* Аномально глубокое проникновение водорода в ниобий при воздействии импульсов высокотемпературной водородной плазмы. Препринт ОИЯИ Р14-2011-88. Дубна, 2011.
10. *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.
11. *Den Broeder F. J. A.* Visualization of Hydrogen Migration in Solids Using Switchable Mirrors // Nature. 1998. V. 394. P. 656–658.
12. *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.
13. *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 общ. ред. А. Н. Сисакяна. Дубна, 2008. С. 142–154.
14. *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.
15. *Боровицкая И. В. и др.* Перераспределение имплантированного дейтерия из фольг при воздействии импульсов плазменного фокуса ПФ-4 // Там же. С. 117.
16. *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.

17. 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.
18. *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).
19. *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).
20. *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. 2012. V. 9, No. 1(171). P. 127–134.
21. 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.
22. Сархадов И., Дидык А. Ю., Пузынин И. В. Динамическое описание ударных волн в материалах при импульсных воздействиях // Материалы XVIII Междунар. научно-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Судак, Крым, Украина, 15–24 сент. 2011 г. С. 76–79.
23. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
24. Жирифалько Л. Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975. 382 с.
25. Физические величины: Справ. / Под ред. И. Г. Григорьева и Е. З. Мехлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1234 с.

Получено 10 августа 2011 г.