

P13-2015-61

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ
И ВОДОРОДА В СБОРКАХ Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta
И Nb|CD₂|Nb ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ
НА УСТАНОВКЕ ПФ-4

Направлено в журнал «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные
и нейтронные исследования»



Г. Г. Бондаренко¹, А. Ю. Дидык, И. В. Боровицкая²,
В. С. Куликаускас³, А. А. Ерискин^{1,4}, В. Я. Никулин^{4,5},
П. В. Силин⁴, И. В. Волобуев⁴, В. Белоус⁶,
Я. Васяк⁶, Е. Хаевска⁶

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

² Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

⁴ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

⁵ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

⁶ Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

Бондаренко Г. Г. и др.

P13-2015-61

Исследование распределения дейтерия и водорода в сборках Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb после воздействия высокотемпературной аргонной плазмы на установке ПФ-4

Сборки из фольг Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb были облучены 30 импульсами аргонной высокотемпературной плазмы на установке «Плазменный фокус» (ПФ-4). После облучения все образцы фольг исследовали методом регистрации ядер отдачи водорода и дейтерия (ERDA) с обеих сторон каждой фольги. Обнаружено перераспределение водорода и дейтерия в стопках фольг. Экспериментальные результаты по сверхглубокому проникновению легких газовых примесей (водорода и дейтерия) объясняются на основе воздействия на фольги ударных волн и ускоренной диффузии под действием внешней силы.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2015

Bondarenko G. G. et al.

P13-2015-61

Investigation of the Distribution of Deuterium and Hydrogen in the Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta and Nb|CD₂|Nb Assemblies after Exposure to High-Temperature Argon Plasma at the PF-4 Set-Up

Assemblies of Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta and Nb|CD₂|Nb foils were irradiated by 30 pulses of high-temperature argon plasma on the "Plasma Focus" (PF-4) set-up. After irradiation, all the samples of foils were investigated by registration of hydrogen and deuterium recoils (ERDA) on both sides of each foil. Redistribution of hydrogen and deuterium in the stacks of foils was found. Experimental results on ultra-deep penetration of light gaseous impurities as hydrogen and deuterium are explained based on the effects of shock waves on the foil and accelerated diffusion by an external force.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2015

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в связи с успехами в лазерной технике и создании мощных импульсных лазеров в пико- (10^{-12} с) и фемтосекундных (10^{-15} с) диапазонах значительное развитие получила относительно новая область науки — физика высокой плотности энергии [1–4]. Помимо этого сформировалось и другое важное направление исследований по воздействию мощных импульсов лазерного излучения с целью создания лазерного управляемого ядерного синтеза.

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, обусловленным процессами перераспределения легкой примеси водорода, всегда присутствующего в металлах, и дейтерия, содержащегося в дейтерированном полиэтилене $(CD_2)_n$, от импульсной аргоновой плазмы, которые изучались методом детектирования упругорассеянных атомов отдачи (elastic recoil detection — ERDA) водорода и дейтерия при резерфордском обратном рассеянии (Rutherford backscattering spectrometry — RBS).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях была использована методика облучения набора фольг из металлов на установке ПФ-4 («Плазменный фокус») в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН [3–5] для получения мощных потоков плазмы и изучения ее воздействия на материалы. Облучение образцов сборок металлов Ta, Nb и дейтерированного полиэтилена проводилось аргоновой высокотемпературной плазмой. 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 энергии, вносимой в поверхность мишени до $\sim 10^8\text{--}10^9$ Вт/см², выход нейтронов до $\sim 10^8$ за импульс

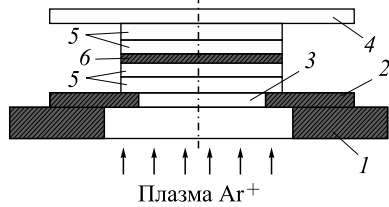


Рис. 1. Сборка металлических фольг для облучения образцов импульсной аргонной высокотемпературной плазмой на плазменном фокусе ПФ-4 [4, 5] (поток плазмы снизу): 1 — нижняя часть дискового держателя образцов на четыре сборки из нержавеющей стали X18H10T (НС); 2 — передняя диафрагма с диаметром отверстия 3, равным 10 или 15 мм; 4 — прижимная пластина из нержавеющей стали; 5 — две или четыре фольги из одного материала; 6 — дейтерированный полиэтилен $(\text{CD}_2)_n$

10 кэВ на ПФ-4 пробег таких ионов в фольгах мал, а их концентрация относительно низкая. Для удобства, как и в работах [8, 9, 14, 15] и в монографии [16], использованы обозначения для фольг в виде $^1\text{Мет-1}^2$, верхние индексы обозначают: 1 — передняя сторона, 2 — дальняя сторона, а цифра рядом (здесь 1) — номер фольги в сборке.

дейтериевой плазмы, время между импульсами для частичного охлаждения мишени не менее 5–6 мин.

В выполненных экспериментах по изучению воздействия аргонной высокотемпературной плазмы расстояние от анодной вставки до мишени составляло 45 мм (рис. 1). При воздействии дейтериевой плазмы на образцы осуществлялось также измерение выхода нейтронов из термоядерной реакции $^2_1d + ^2_1d \rightarrow n + ^3_2\text{He}$ из дейтерированного полиэтилена нейтронными детекторами, описанными в [6, 7].

На рис. 1 представлена схема облучения на установке ПФ-4.

Во всех трех случаях толщина дейтерированного полиэтилена составляла 240 мкм.

Для изучения воздействия использовалась аргонная плазма, поскольку при максимальной энергии ионов аргона до

ERDA-ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГОРАССЕЯННЫХ ЯДЕР ОТДАЧИ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ

В экспериментах использовались следующие сборки из фольг:

- 1) Та-1|(CD₂)_n|Та-2 с толщиной фольг по 100 мкм;
- 2) Та-1|Та-2|(CD₂)_n|Та-3|Та-4 с толщиной фольг по 50 мкм;
- 3) Nb-1|(CD₂)_n|Nb-2 с толщиной фольг по 105 мкм.

Все ERDA-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 Научно-исследовательского

института ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ. Обработка спектров проводилась с применением стандартной программы SIMNRA 6.06.

ERDA-исследования упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Ta-1|(CD₂)_n|Ta-2. На рис. 2 показан спектр ERDA, измеренный в первой фольге из 1-й сборки (¹Ta-1). Видно, что дейтерий присутствует в виде затянутого хвоста на графике.

На рис. 3 представлены спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 1-й сборки Ta-1², и концентрации тантала, водорода и дейтерия (б).

Из спектра ERDA (рис. 3, а) и распределения концентраций (рис. 3, б) можно сделать вывод, что концентрация водорода составляет в максимуме до 35 ат. %, а концентрация дейтерия затянута на большую глубину и в макси-

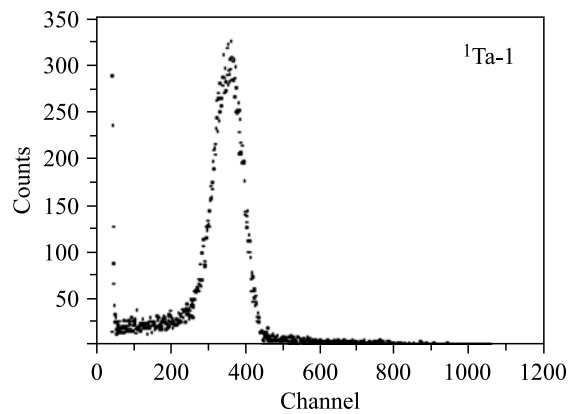


Рис. 2. Спектр ERDA, измеренный в ¹Ta-1

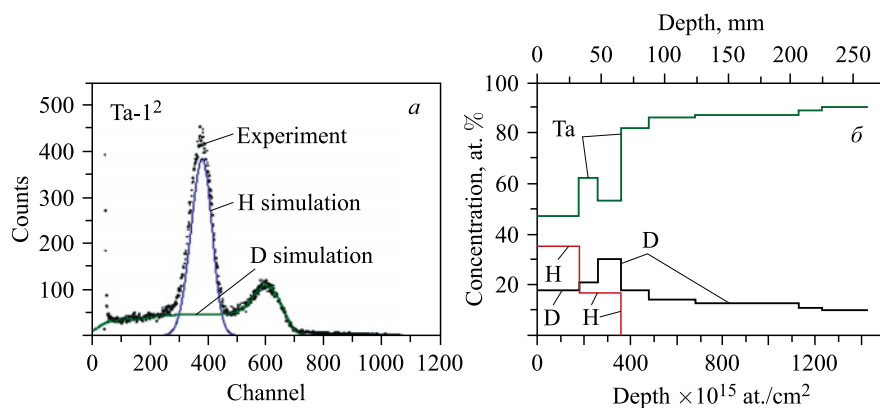


Рис. 3. Спектр ERDA, измеренный в первой фольге из 1-й сборки Ta-1² (а), и концентрации тантала, водорода и дейтерия (б)

муме достигает около 29 ат.%. Поэтому можно сделать вывод, что имеет место обратное проникновение дейтерия из дейтерированного полиэтилена в первую танталовую фольгу.

На рис.4 представлены спектры ERDA из 1-й сборки ${}^1\text{Ta-2}$ (а) и Ta-2^2 (б).

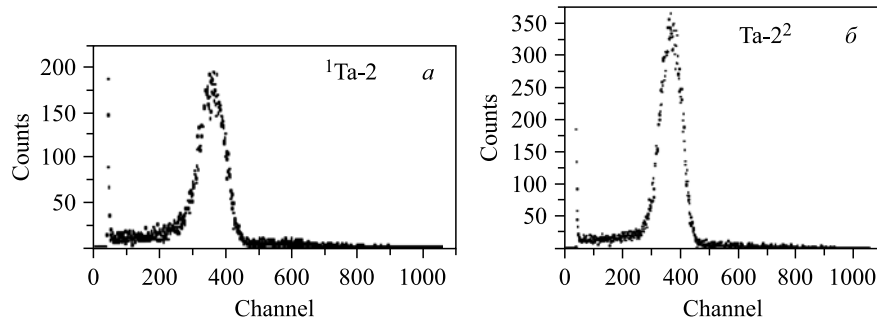


Рис. 4. Спектры ERDA из 1-й сборки ${}^1\text{Ta-2}$ (а) и Ta-2^2 (б)

Видно, что здесь также дейтерий присутствует в виде затянутых хвостов на графиках, как и на рис. 2.

Приведем расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия Σ , а также их концентрации в максимумах для обеих Та-фольг в сборке 1.

Имеем:

$$\begin{aligned} \Sigma_D^{1\text{Ta-1}} &\Rightarrow \text{малая концентрация;} \\ \Sigma_D^{\text{Ta-1}^2} &= 2,37 \cdot 10^{17} \text{ ат./см}^2; \quad n_{D,\text{max}}^{\text{Ta-1}^2} = 30 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_H^{\text{Ta-1}^2} &= 9,36 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{H,\text{max}}^{\text{Ta-1}^2} = 35 \text{ ат. \%} \\ \Sigma_D^{1\text{Ta-2}} &= 4,42 \cdot 10^{15} \text{ ат./см}^2; \quad n_{D,\text{max}}^{1\text{Ta-2}} = 0,9 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_H^{1\text{Ta-2}} &= 2,81 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{H,\text{max}}^{1\text{Ta-2}} = 9,5 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_D^{\text{Ta-2}^2} &\Rightarrow \text{малая концентрация;} \\ \Sigma_H^{\text{Ta-2}^2} &= 4,94 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{H,\text{max}}^{\text{Ta-2}^2} = 17 \text{ ат. \%}. \end{aligned}$$

ERDA-исследования упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Та-1|Та-2|(CD₂)_n|Та-3|Та-4. На рис.5 представлены спектры ERDA из первой фольги 2-й сборки ${}^1\text{Ta-1}$ (а) и Ta-1^2 (б).

На рис. 6 показан спектр ERDA во второй фольге из 2-й сборки ${}^1\text{Ta-2}$.

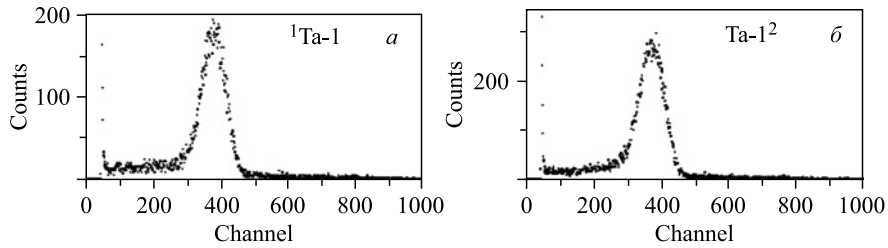


Рис. 5. Спектры ERDA из 2-й сборки ${}^1\text{Ta-1}$ (а) и Ta-1^2 (б)

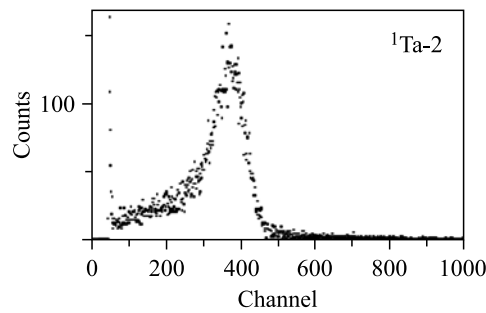


Рис. 6. Спектр ERDA из второй фольги 2-й сборки ${}^1\text{Ta-2}$

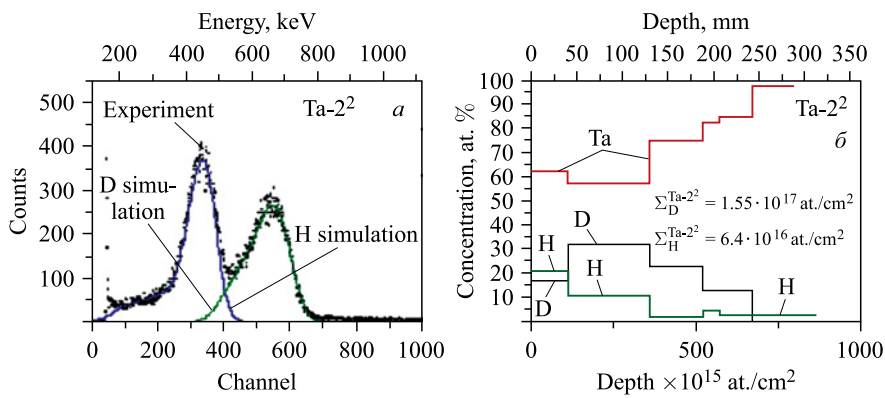


Рис. 7. Спектр ERDA, измеренный во второй фольге из 2-й сборки Ta-2^2 (а), и концентрации тантала, водорода и дейтерия (б)

На рис. 7 представлен спектр ERDA (а), измеренный во второй фольге из 2-й сборки Ta-2^2 , и концентрации тантала, водорода и дейтерия (б).

На рис. 8 приведены спектры ERDA (а), измеренные в третьей фольге из 2-й сборки ${}^1\text{Ta-3}$ (а) и Ta-3^2 (б).

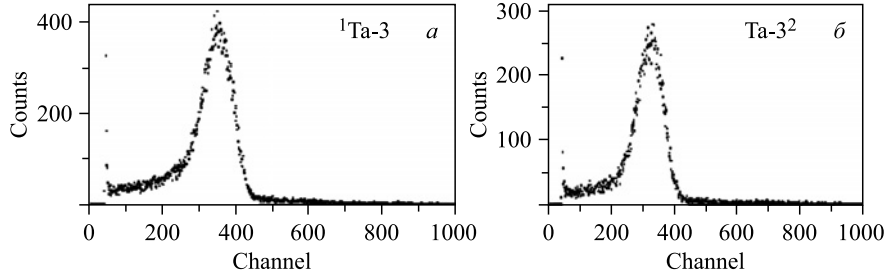


Рис. 8. Спектры ERDA, измеренные в третьей фольге ${}^1\text{Ta-3}$ (а) и Ta-3^2 (б)

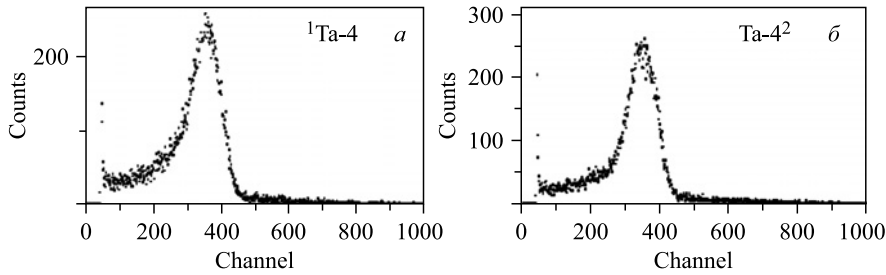


Рис. 9. Спектры ERDA, измеренные в четвертой фольге из 2-й сборки ${}^1\text{Ta-4}$ (а) и Ta-4^2 (б)

На рис. 9 представлены спектры ERDA (а), измеренные в четвертой фольге из 2-й сборки ${}^1\text{Ta-4}$ (а) и Ta-4^2 (б).

Приведем расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия Σ , а также их концентрации в максимумах для четырех Ta-фольг в сборке 2. Имеем:

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{D}}^{{}^1\text{Ta-1}} &\Rightarrow \text{малая концентрация;} \\ \Sigma_{\text{H}}^{{}^1\text{Ta-1}} &= 2,74 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{{}^1\text{Ta-1}} = 11 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-1}^2} &\Rightarrow \text{малая концентрация;} \\ \Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-1}^2} &= 4,2 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-1}^2} = 14 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{{}^1\text{Ta-2}} &\Rightarrow \text{малая концентрация;} \\ \Sigma_{\text{H}}^{{}^1\text{Ta-2}} &= 5,25 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{{}^1\text{Ta-2}} = 14 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-2}^2} &= 1,55 \cdot 10^{17} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{D,max}}^{\text{Ta-2}^2} = 32 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-2}^2} &= 6,4 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-2}^2} = 21 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{{}^1\text{Ta-3}} &= 9,4 \cdot 10^{15} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{D,max}}^{\text{Ta-3}^2} = 1,7 \text{ ат. \%}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{H}}^{1\text{Ta-3}} &= 6,6 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; & n_{\text{H,max}}^{1\text{Ta-3}} &= 18 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{1\text{Ta-3}^2} &\Rightarrow \text{малая концентрация}; \\ \Sigma_{\text{H}}^{1\text{Ta-3}^2} &= 4,99 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; & n_{\text{H,max}}^{1\text{Ta-3}^2} &= 12,7 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{1\text{Ta-4}} &\Rightarrow \text{малая концентрация}; \\ \Sigma_{\text{H}}^{1\text{Ta-4}} &= 4,78 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; & n_{\text{H,max}}^{1\text{Ta-4}} &= 12 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{1\text{Ta-4}^2} &\Rightarrow \text{малая концентрация}; \\ \Sigma_{\text{H}}^{1\text{Ta-4}^2} &= 4,36 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; & n_{\text{H,max}}^{1\text{Ta-4}^2} &= 11,5 \text{ ат. \%}. \end{aligned}$$

ERDA-исследования упругорассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Nb-1|(CD₂)_n|Nb-2. На рис. 10 представлен спектр ERDA, измеренный в первой фольге 3-й сборки ¹Nb-1.

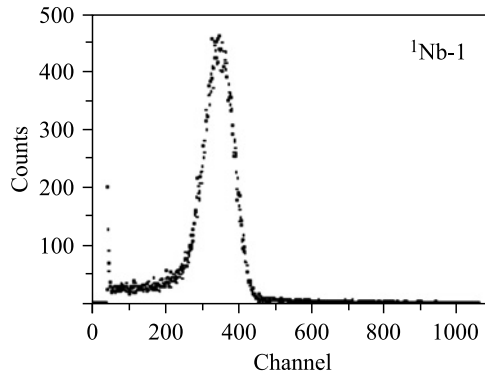


Рис. 10. Спектр ERDA из первой фольги 3-й сборки ¹Nb-1

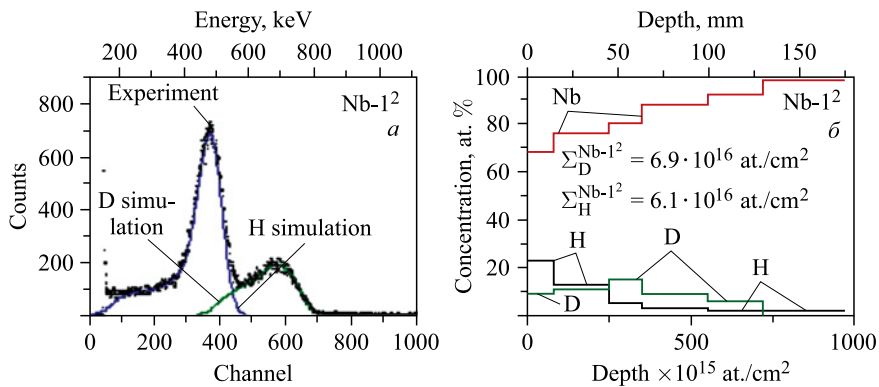


Рис. 11. Спектр ERDA, измеренный в первой фольге из 3-й сборки Nb-1² (a), и концентрации ниобия, водорода и дейтерия (б)

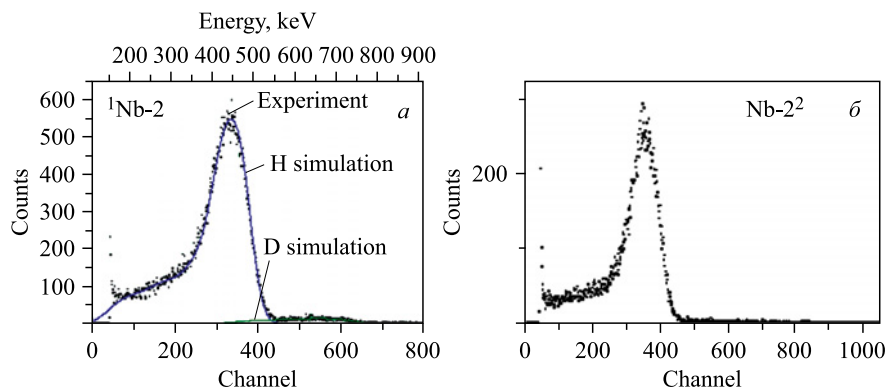


Рис. 12. Спектры ERDA, измеренные во второй фольге 3-й сборки ${}^1\text{Nb-2}$ (а) и Nb-2^2 (б)

На рис. 11 представлен спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 3-й сборки $\text{Nb-1}^2()$ и концентрации ниобия, водорода и дейтерия (б).

На рис. 12 показаны спектры ERDA, измеренные во второй фольге 3-й сборки ${}^1\text{Nb-2}$ (а) и Nb-2^2 (б).

Приведем расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия Σ , а также их концентрации в максимумах для обеих Nb-фольг в сборке 3. Имеем:

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{D}}^{{}^1\text{Nb-1}} &\Rightarrow \text{малая концентрация;} \\ \Sigma_{\text{H}}^{{}^1\text{Nb-1}} &= 6,8 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{{}^1\text{Nb-1}} = 18 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{\text{Nb-1}^2} &= 6,9 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{D,max}}^{\text{Nb-1}^2} = 14 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{H}}^{\text{Nb-1}^2} &= 6,1 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{\text{Nb-1}^2} = 23 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{{}^1\text{Nb-2}} &= 1,15 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{{}^1\text{Nb-2}} = 1,9 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{H}}^{{}^1\text{Nb-2}} &= 1,05 \cdot 10^{17} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{{}^1\text{Nb-2}} = 21 \text{ ат. \%}; \\ \Sigma_{\text{D}}^{\text{Nb-2}^2} &\Rightarrow \text{малая концентрация;} \\ \Sigma_{\text{H}}^{\text{Nb-2}^2} &= 4,6 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; \quad n_{\text{H,max}}^{\text{Nb-2}^2} = 11 \text{ ат. \%}. \end{aligned}$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнивая рис. 7, а и рис. 11, а с рис. 3, а, можно сделать вывод, что аппроксимация экспериментального спектра на рис. 3, а проведена не вполне корректно. Из сравнения спектров Ta-2^2 (рис. 7, а) и Nb-1^2 (рис. 11, а) видно,

что водород распространяется на всю толщину фольг, а дейтерий проникает только до определенных глубин. Тем не менее можно сделать однозначный вывод по всем трем сборкам, что в фольгах Ta-1² (сборка 1), Ta-2² (сборка 2) и Nb-1², примыкающих к дейтерированному полиэтилену (CD₂)_n, особенно к ближней к ПФ-4, дейтерий распространяется на значительную глубину, при этом прилипания полиэтилена к металлическим фольгам не наблюдалось, а дейтерированные фольги (CD₂)_n внешне производили впечатление неповрежденных. Помимо этого, как видно из рис. 4, а, 8, а и 12, а, в этих фольгах дейтерий присутствует и проникает на значительную глубину.

Обнаруженное явление сверхглубокого проникновения водорода, а также и дейтерия (см. [11, 12, 16–19]) может быть объяснено воздействием мощных ударных волн [1–5, 12–15, 16–19] на перераспределение водорода и дейтерия с переносом их как легких и слабосвязанных примесей на большие глубины.

Другим более разработанным подходом (см. [11, 12, 16–18]) является рассмотрение ускоренной диффузии примесей при наличии внешних движущих сил F (см. монографию [10]). Тогда законы Фика для потока частиц следует представить в виде (см. [10] и [19])

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

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

где внешняя движущая сила F придает каждому атому среднюю дополнительную скорость $\langle \bar{V} \rangle_F$, здесь 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, 11, 12, 16–18]. 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 волны сжатия и волной разряжения за фронтом ударной волны. Поэтому на относительно небольших глубинах $R < R_{E-S}$ в качестве дополнительной скорости легкого несвязанного в химическую связь и (или) слабосвязанного примесного атома $\langle \bar{V} \rangle_F$, возможно, следует выбирать скорость объемной продольной $V_{||}$ или поперечной V_{\perp} упругих волн.

Полученные в данной работе результаты согласуются с ранее выполненными исследованиями в сборках фольг Nb|CD₂|Nb, облученных водородной плазмой [8], в сборках фольг Ta|CD₂|Ta, облученных азотной высокотемпературной плазмой [17, 18] (см. также [16]), а также распределения дейтерия и водорода в вольфрамовых фольгах с тяжелой водой [19].

Следует отметить, что качество фольг после воздействия высокотемпературной плазмы на ближних к ПФ-4 сторонах первых фольг в сборках далеко от совершенного для надежных количественных RBS- и ERDA-исследований.

При измерении выхода нейтронов под воздействием высокотемпературной плазмы аргона на сборки Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb при отдельных импульсах плазмы наблюдались выходы нейтронов, превышающие средний уровень фона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате облученияборок из фольг Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb 30 импульсами аргоновой высокотемпературной плазмы на установке «Плазменный фокус» (ПФ-4) методом регистрации ядер отдачи водорода и дейтерия (ERDA) обнаружено сверхглубокое проникновение водорода и дейтерия в стопках фольг. Данный эффект связывается с воздействием на облученные материалы ударных волн и с ускоренной диффузией под действием внешней силы [8–10].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фортов В. Е.* Экстремальные состояния вещества на земле и в космосе. М.: Физматлит, 2008. 264 с.
2. *Фортов 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., 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. АН. 2009. Т. 428, № 4. С. 471–473.
6. *Волбуев И. В. и др.* Детекторы для нейтронов из короткоживущей плазмы // Тр. ФИАН. 1977. Т. 94. С. 21–28.
7. *Волбуев И. В. и др.* Исследование пространственной анизотропии нейтронного излучения на установках «Плазменный фокус» // Краткие сообщ. по физике. 1987. № 11. С. 32–34.
8. *Didyk A. Yu.* Anomalous deep penetration of hydrogen and deuterium into a sandwich of two niobium foils and deuterium polyethylene (CD₂)_n under action of pulse high temperature hydrogen plasma // Part. Nucl., Lett. 2012. V. 9, No. 2. P. 186–191.
9. *Didyk A. Yu.* Anomalous deep penetration of hydrogen in niobium at high temperature exposure pulses of hydrogen plasma // Part. Nucl., Lett. 2012. V. 9, No. 3. P. 253–258.

10. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
11. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 1963. 632 с.
12. Великович А. Л., Либерман М. А. Физика ударных волн в газах и плазме. М.: Наука, 1987. 295 с.
13. Блейзер Г. А., Кривобоков В. П., Пащенко О. В. Тепломассоперенос в твердом теле при воздействии мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1999. 176 с.
14. Didyk A. Yu. et al. Storage of deuterium and hydrogen in Ni-foils under influence of high temperature deuterium plasma // J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. V. 7, No. 1. P. 18–22.
15. Didyk A. Yu. et al. Transport of hydrogen in Nb-foil set under action of high temperature hydrogen plasma at “Plasma Focus” set up // J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. V. 7, No. 4. P. 707–710.
16. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. Properties of hydrogen and its isotopes under high pressure, and technological applications. Dubna: JINR, 2013. 320 p.
17. Дидык А. Ю. и др. Распределения дейтерия и водорода в сборке Ta|CD₂|Ta фольг при воздействии высокотемпературной азотной плазмы // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 8. С. 87–94.
18. Didyk A. Yu. et al. Deuterium and hydrogen distribution in a stack of Ta|(CD₂)_n|Ta foils under the action of high temperature pulsed nitrogen plasma // J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. V. 8, No. 4. P. 814–820.
19. Дидык А. Ю. и др. Распределение водорода и дейтерия в фольгах из вольфрама, облученных дейтериевой высокотемпературной плазмой в заполненных H₂O и D₂O герметичных камерах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 8. С. 1–9.

Получено 14 июля 2015 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 28.09.2015.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,06. Тираж 245 экз. Заказ № 58639.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/