

Влияние ударных волн, генерируемых высокотемпературной аргоновой плазмой, на перераспределение водорода и дейтерия в сборках из танталовых и ниобиевых фольг

**А. Ю. Дидык, А. А. Ерискин, Г. Г. Бондаренко, И. В. Боровицкая,
В. С. Куликаускас, В. Я. Никулин, П. В. Силин, И. В. Волобуев,
В. Белоус, Я. Васяк, Е. Хаевска**

Исследовано перераспределения водорода и дейтерия в сборках металлических фольг Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb, облученных импульсами аргоновой высокотемпературной плазмы на установке Плазменный фокус. Облученные образцы фольг были изучены методом регистрации ядер отдачи водорода и дейтерия (ERDA). Обнаружено сверхглубокое проникновение в мишени легких газовых примесей (водорода и дейтерия). Предполагается, что данное явление обусловлено воздействием ударных волн, генерируемых плазменным импульсом, и ускорением диффузионных процессов.

Ключевые слова: плазменный фокус, высокотемпературная импульсная плазма, диффузия, перераспределение водорода и дейтерия, ниобий, тантал, Nb, Ta, ударные волны, мощные потоки энергии.

Введение

За последние годы в связи с успехами в создании мощных импульсных лазеров в пико- (10^{-12} с) и фемтосекундных (10^{-15} с) диапазонах, а также мощных сильноточных разрядов (быстрый z-пинч, плазменный фокус) значительное развитие получила относительно новая область науки — физика высокой плотности энергии [1 – 4]. Помимо этого, сформировалось и другое важное направление исследований по воздействию мощных высокоэнергетических импульсов на материалы, проводимых по программе инерциального управляемого ядерного синтеза.

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

Цель настоящей работы — изучение перераспределения водорода (всегда присутствующего в виде

примесей) в металлических фольгах при воздействии импульсной аргоновой плазмы на их поверхность, а также перераспределение дейтерия, вводимого в фольги из дейтерированного полиэтилена (CD₂)_n, в результате воздействия плазменных импульсов.

Методика исследований

В исследованиях была использована методика облучения набора фольг из металлов мощными потоками импульсной плазмы, создаваемой на установке типа Плазменный фокус (ПФ-4, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН) [3 – 5]. 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 $\sim 10^{18}$ см⁻³, длительность плазменного импульса — 50 – 100 нс, плотность потока энергии на поверхности мишени $\sim 10^8$ – 10^9 Вт/см², абсолютный выход нейтронов при использовании в качестве рабочего газа дейтерия — $\sim 10^8$ за импульс, время между плазменными импульсами — не менее 5 – 6 мин.

На рис. 1 представлена схема сборки и облучения на установке ПФ-4. Сборка состояла из металлических фольг Ta, Nb и дейтерированного полиэтилена. Сборки располагали на расстоянии 45 мм от анодной вставки. В экспериментах облучение образцов сборок проводили при использовании в качестве рабочего газа в ПФ-4 аргона и дейтерия. При воздействии дейтериевой плазмы на образцы измеряли абсолютный выход нейтронов, образующихся в результате ядерной реакции ${}^2_1d + {}^2_1d \rightarrow n + {}^3_2\text{He}$. Измерение нейтронного выхода осуществляли активационными детекторами, описанными в [6, 7].

Использование аргоновой плазмы обусловлено малым пробегом ионов аргона в фольгах (при максимальной энергии ионов аргона до 10 кэВ) и относительно низкой их концентрацией. По расчетным данным, полученным с помощью программы SRIM (www.srim.org), глубины проникновения ионов Ar, D и He в танталовую (Ta) мишень при энергии 10 кэВ равны соответственно: 5, 50 и 25 нм (а если мишень из ниобия (Nb), то: 7, 68 и 36 нм). При 20 кэВ, Ta-мишень: 8,5, 102 и 48 нм; Nb-мишень: 12, 128 и 69 нм.

Для удобства, как в [8, 9, 14–16], использованы обозначения для фольг в виде ${}^1\text{Мет-}1^2$, верхние индексы означают: 1 — передняя сторона, 2 — дальняя сторона, а 1 — номер фольги в сборке.

Распределение водорода и дейтерия исследовали методом детектирования упруго рассеянных атомов отдачи (elastic recoil detection — ERDA) водорода и дейтерия при Резерфордском обратном рассеянии (Rutherford backscattering spectrometry — RBS).

В экспериментах использовали следующие сборки из фольг:

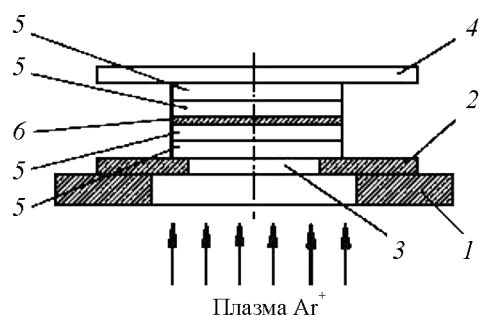


Рис. 1. Сборка металлических фольг для облучения образцов импульсной аргоновой высокотемпературной плазмой на плазменном фокусе ПФ-4 [4, 5] (поток плазмы снизу). 1 — нижняя часть дискового держателя образцов на четыре сборки из нержавеющей стали X18H10T (НС); 2 — передняя диафрагма с диаметром отверстия 3; равным 10 или 15 мм; 4 — прижимная пластина из нержавеющей стали; 5 — две или четыре фольги из одного материала; 6 — дейтерированный полиэтилен (CD_2)_n.

- 1) Ta-1|(CD₂)_n|Ta-2 с толщиной фольг по 100 мкм;
- 2) Ta-1|Ta-2|(CD₂)_n|Ta-3|Ta-4 с толщиной фольг по 50 мкм;

- 3) Nb-1|(CD₂)_n|Nb-2 с толщиной фольг по 105 мкм.

Во всех трех случаях толщина дейтерированного полиэтилена составляла 240 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 (НИИЯФ МГУ). Обработка спектров была проведена с применением стандартной программы SIMNRA 6.06 (<http://www.if.usp.br/~lamfi/guia-simnra.pdf>).

Результаты эксперимента

ERDA-исследования упруго рассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Ta-1|(CD₂)_n|Ta-2

На рис. 2 представлен спектр ERDA, измеренный в первой фольге из 1-й сборки (${}^1\text{Ta-1}$). На присутствие дейтерия указывает протяженный “хвост” на графике.

На рис. 3 представлены спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 1-й сборки — Ta-1², в сравнении с расчетными значениями (“расчетный” — означает, что спектр был построен с использованием программы SIMNRA), и концентрации Ta, водорода и дейтерия в ней (б).

Из спектра ERDA (рис. 3а) и распределения концентраций (рис. 3б) можно сделать вывод, что содержание водорода в фольге составляет максимум до 35 ат. %, а концентрация дейтерия “затянута” на большую глубину и в максимуме достигает около 29 ат.%. Поэтому можно сделать вывод, что имеет место обратное проникновение дейтерия из дейтерированного полиэтилена в первую танталовую фольгу.

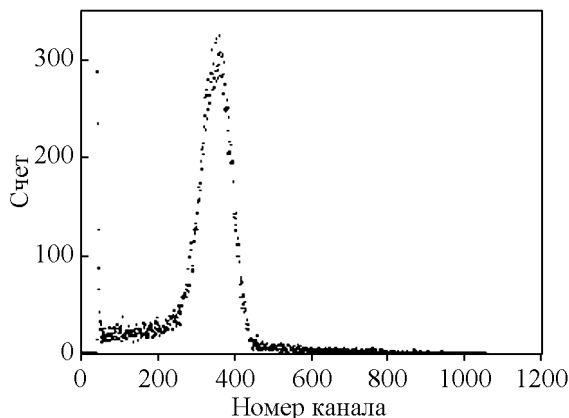


Рис. 2. Спектр ERDA, измеренный в ${}^1\text{Ta-1}$.

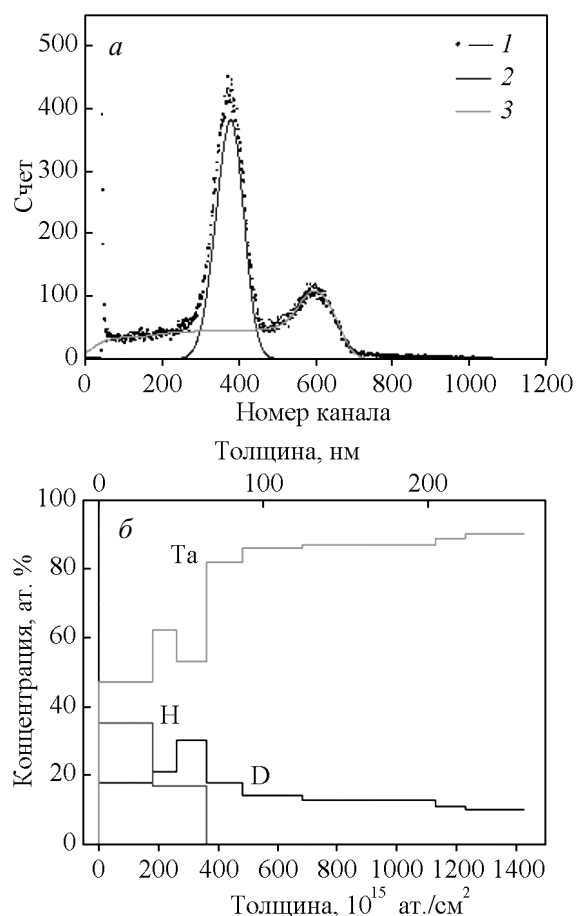


Рис. 3. Спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 1-й сборки — Ta-1², и концентрации Ta, водорода и дейтерия (б). 1 — эксперимент, 2 — H расчетный, 3 — D расчетный.

На рис. 4 представлены спектры ERDA из 1-й сборки — ¹Ta-2 (а) и Ta-2² (б).

На рис. 4 как и на рис. 2 видно наличие протяженных “хвостов”, что также указывает на присутствие дейтерия на большой глубине.

Представим расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия (Σ), а также их концентрации в максимумах ($n_{\max}$) для обеих Ta фольг в сборке 1.

Имеем:

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-1}} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-1}^2} = 2,37 \cdot 10^{17} \text{ ат./см}^2; n_{D,\max}^{1\text{Ta-1}^2} = 30 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_H^{1\text{Ta-1}^2} = 9,36 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\max}^{1\text{Ta-1}^2} = 35 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-2}} = 4,42 \cdot 10^{15} \text{ ат./см}^2; n_{D,\max}^{1\text{Ta-2}} = 0,9 \text{ ат.}\%;$$

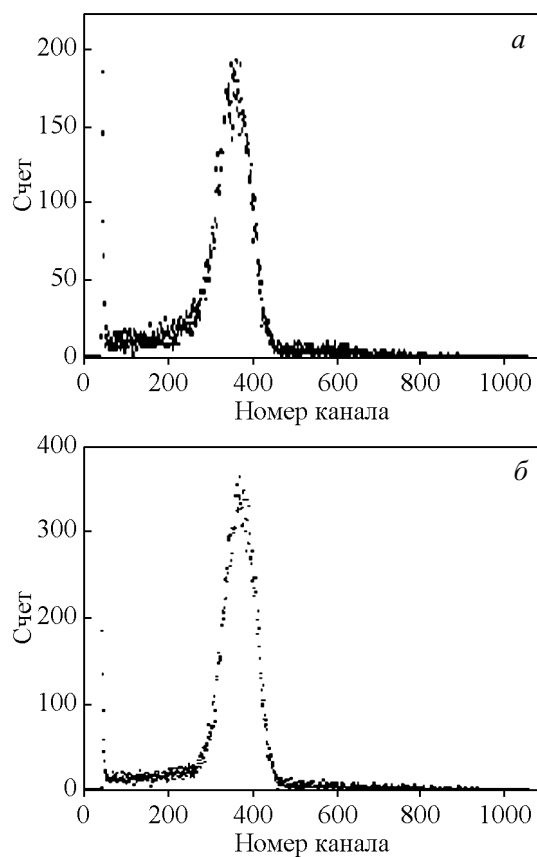


Рис. 4. Спектры ERDA из 1-ой сборки — ¹Ta-2 (а) и Ta-2² (б).

$$\Sigma_H^{1\text{Ta-2}} = 2,81 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\max}^{1\text{Ta-2}} = 9,5 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-2}^2} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

$$\Sigma_H^{1\text{Ta-2}^2} = 4,94 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\max}^{1\text{Ta-2}^2} = 17 \text{ ат.}\%.$$

ERDA-исследования упруго рассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Ta-1|Ta-2|(CD)₂|Ta-3|Ta-4

На рис. 5 представлен спектр ERDA (а), измеренный во второй фольге из 2-й сборки — Ta-2², и концентрации Ta, водорода и дейтерия (б).

На рис. 6 представлены спектры ERDA (а), измеренные в третьей фольге из 2-й сборки — ¹Ta-3 (а) и Ta-3² (б).

Представим расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия (Σ), а также их концентрации в максимумах ($n_{\max}$) для четырех Ta фольг в сборке 2:

$$\Sigma_D^{1\text{Ta-1}} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

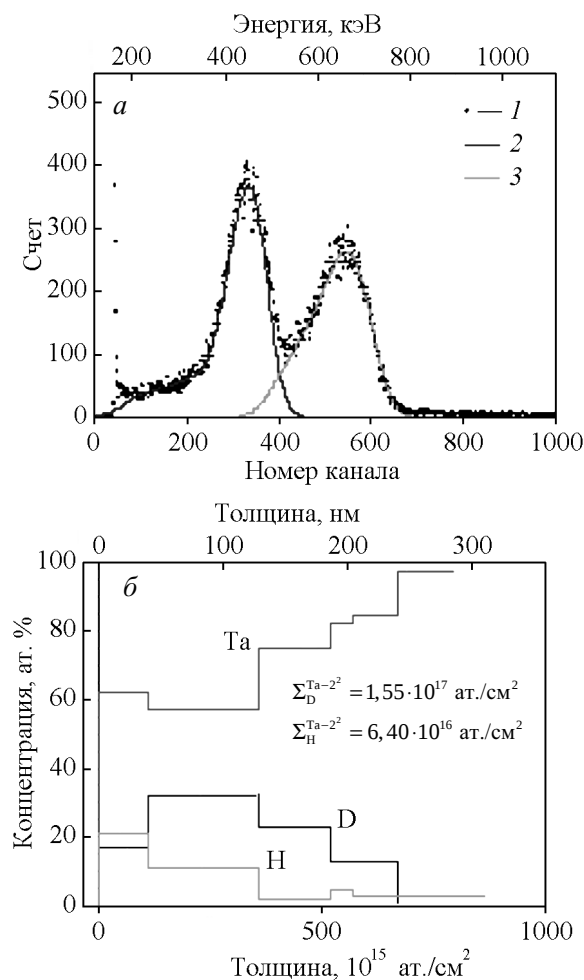


Рис. 5. Спектр ERDA (а), измеренный во второй фольге из 2-й сборки — Ta-2², и концентрации Ta, водорода и дейтерия (б). 1 — эксперимент, 2 — H расчетный, 3 — D расчетный.

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-1}} = 2,74 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-1}} = 11 \text{ ат.}\%$$

$$\Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-1}^2} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-1}^2} = 4,2 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-1}^2} = 14 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-2}} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-2}} = 5,25 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-2}} = 14 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-2}^2} = 1,55 \cdot 10^{17} \text{ ат./см}^2; n_{\text{D,max}}^{\text{Ta-2}^2} = 32 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-2}^2} = 6,4 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-2}^2} = 21 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-3}} = 9,4 \cdot 10^{15} \text{ ат./см}^2; n_{\text{D,max}}^{\text{Ta-3}} = 1,7 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-3}} = 6,6 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-3}} = 18 \text{ ат.}\%;$$

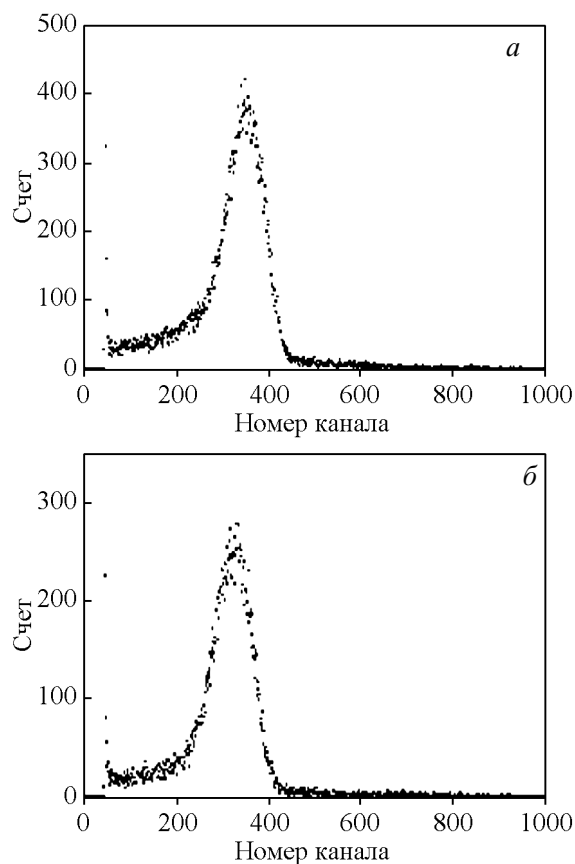


Рис. 6. Спектры ERDA, измеренные в третьей фольге ¹Ta-3 (а) и Ta-3² (б).

$$\Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-3}^2} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-3}^2} = 4,99 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-3}^2} = 12,7 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-4}} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-4}} = 4,78 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-4}} = 12 \text{ ат.}\%;$$

$$\Sigma_{\text{D}}^{\text{Ta-4}^2} \Rightarrow \text{концентрация на уровне фона};$$

$$\Sigma_{\text{H}}^{\text{Ta-4}^2} = 4,36 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{\text{H,max}}^{\text{Ta-4}^2} = 11,5 \text{ ат.}\%.$$

ERDA-исследования упруго рассеянных ядер отдачи водорода и дейтерия в наборе фольг Nb-1(CD₂)_n|Nb-2

На рис. 7 представлен спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 3-й сборки — Nb-1²(а) и концентрации Nb, водорода и дейтерия (б).

На рис. 8 представлены спектры ERDA, измеренные во второй фольге 3-й сборки ¹Nb-2 (а) и Nb-2² (б).

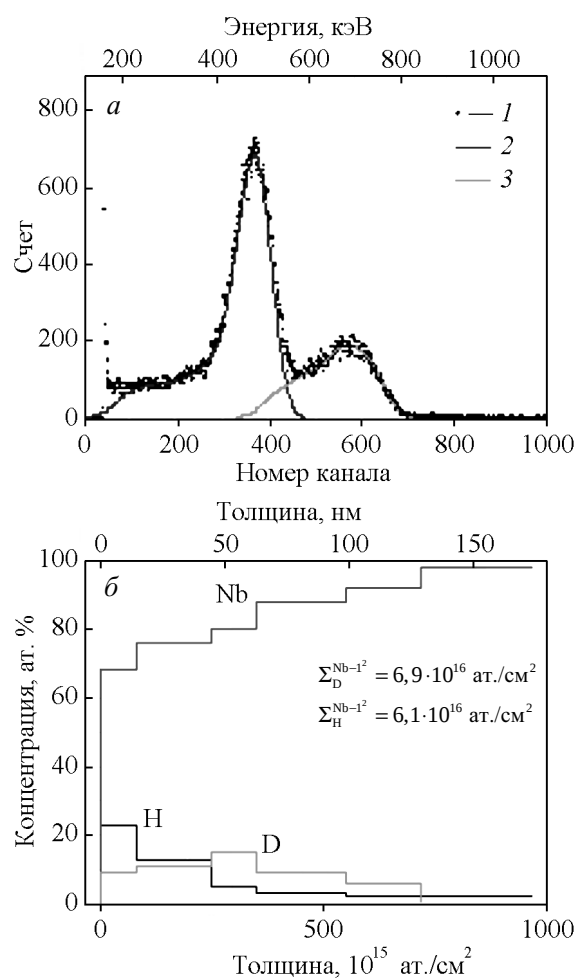


Рис. 7. Спектр ERDA (а), измеренный в первой фольге из 3-й сборки – Nb-1², и концентрации Та, водорода и дейтерия (б). 1 – эксперимент, 2 – Н расчетный, 3 – D расчетный.

Представим расчетные значения интегральных концентраций водорода и дейтерия (Σ), а также их концентрации в максимумах ($n_{\max}$) для обеих Nb фольг в сборке 3:

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

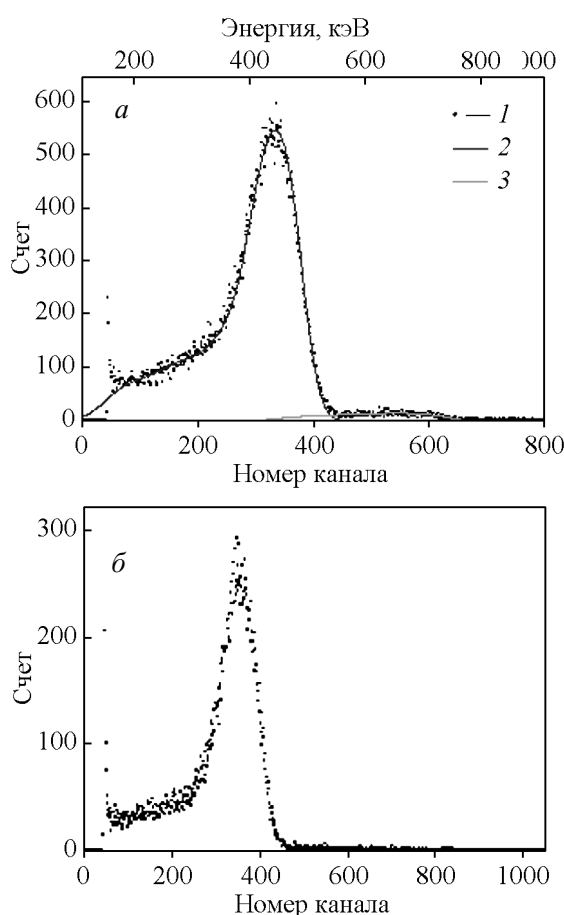


Рис. 8. Спектры ERDA, измеренные во второй фольге 3-й сборки ¹Nb-2 (а) и Nb-2² (б). 1 – эксперимент, 2 – Н расчетный, 3 – D расчетный.

$$\Sigma_H^{Nb-2^2} = 4,6 \cdot 10^{16} \text{ ат./см}^2; n_{H,\max}^{Nb-2^2} = 11 \text{ ат.}\%.$$

Обсуждение результатов

При сравнении спектров Та-2² (рис. 5а) и Nb-1² (рис. 7а) 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 Та-1² (сборка 1), Та-2² (сборка 2) и Nb-1² (сборка 3) фольгах, примыкающих к дейтерированному полиэтилену (CD₂)_n, (особенно в ближней к ПФ-4), дейтерий распространяется на значительную глубину. Отметим, что при этом прилипания полиэтилена к металлическим фольгам не происходит, а дейтерированные фольги (CD₂)_n внешне производили впечатление неповрежденных.

Обнаруженное явление сверхглубокого проникновения водорода, по сравнению с расчетными данными (примерный диапазон глубин проникновения

ионов в Ta и Nb мишени при энергиях ионов от 10 до 20 кэВ составляет $\sim 46 - 104$ нм для водорода, и $\sim 50 - 130$ нм для дейтерия) [11, 12, 16 – 19], может быть объяснено воздействием мощных ударных волн [1 – 5, 12 – 15, 16 – 19] на перераспределение газовых атомов с переносом их, как легких и слабосвязанных примесей, на большие глубины. Следует отметить, что эффект сверхглубокого проникновения дейтерия наблюдался также в экспериментах по воздействию кумулятивных плазменных потоков на ванадий [20].

В качестве возможного объяснения сверхглубокого проникновения легких примесей можно также рассмотреть ускоренную диффузию примесей при наличии внешних движущих сил F [10, 11, 12, 16 – 18]). Тогда законы Фика для потока частиц ($\bar{J}$) следует представить в виде [10, 19]:

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

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

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 сопоставима 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 разрежения за фронтом ударной волны. Поэтому на относительно небольших глубинах $R < R_{E-S}$ в качестве дополнительной скорости легкого несвязанного химической связью и (или) слабо связанного примесного атома ($\langle\bar{V}\rangle_F$), возможно,

следует выбрать скорость объемной продольной ($V_{||}$) или поперечной ($V_{\perp}$) упругих волн.

Полученные в данной работе результаты согласуются с ранее выполненными исследованиями сборок фольг Nb|CD₂|Nb, облученных водородной плазмой [8], сборки фольг Ta|CD₂|Ta, облученных азотной высокотемпературной плазмой [16 – 18], а

также распределения дейтерия и водорода в вольфрамовых фольгах с тяжелой водой [19].

При измерении выхода нейтронов при воздействии высокотемпературной дейтериевой плазмы на сборки Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb при отдельных импульсах плазмы наблюдали выходы нейтронов, превышающие средний уровень фона.

Заключение

В результате облученияборок металлических фольг Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta и Nb|CD₂|Nb импульсами аргоновой высокотемпературной плазмы на установке “Плазменный фокус” (ПФ-4) методом регистрации ядер отдачи водорода и дейтерия (ERDA) обнаружено сверхглубокое проникновение в мишени водорода и дейтерия. Данный эффект связывается с воздействием на облученные материалы ударных волн и ускоренной диффузией под действием внешней силы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-02-05995.

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 редакций В.А.Грибкова, М.: Янус-К, 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., Боровицкая И.В., Горшков П.В. и др. Воздействие ударных волн на токонесущие свойства ВТСП ленты YBCO(123). Доклады Академии наук, 2009, т. 428, № 4, с. 471 – 473,.
6. Волобуев И.В., Горбунов Д.Н., Гранаткин Б.Н., Исаков А.И. Детекторы для нейтронов из короткоживущей плазмы. Труды ФИАН, М.: Наука, 1977, т. 94, с. 21 – 28.
7. Krokhnin O.N., Nikulin V.Y., Volobuev I.V. Compact activation detectors for measuring of absolute neutron yield generated by powerful pulsed plasma installations. Czechoslovak Journal of Physics, 2004, v. 54, no. 1, p. 359 – 364.
8. Didyk A.Yu. Anomalously deep penetration of hydrogen and deuterium into a sandwich of two niobium foils and deuterium polyethelene (CD₂)_n under action of pulse high temperature hydrogen plasma. J. 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. *J. Part. Nucl. Lett.*, 2012, v. 9, no. 3, pp. 253 – 258.
10. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978, 248 с.
11. Зельдович Я.Б. и 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., Пашченко О.В. Тепломассоперенос в твердом теле при воздействии мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск, Наука, Сибирское издательство РАН, 1999, 176 с.
14. Didyk A.Yu., Borovitskaja I.V., Wisniewski R. et al. Storage of deuterium and hydrogen in Ni-foils under influence of high temperature deuterium plasma. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, no. 3, p. 22 – 26.
15. Didyk A.Yu., Wisniewski R., Ivanov L.I. et al. Transport of hydrogen in Nb-foil set under action of high temperature hydrogen plasma at “Plasma Focus” set up. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, v. 9, no. 8, p. 1 – 5.
16. Didyk A.Yu., Wisniewski R. Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna, JINR, 2013, 320 p.
17. Дидык А.Ю., Хаевска Е., Хофман А., Куликаускас В.С., Серушкин С.В. 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., Hajewska E., Hofman A., Kulikauskas V.S. and Serushkin S.V. Deuterium and Hydrogen Distribution in a Stack of Ta[(CD₂)_n]/Ta Foils under the Action of High Temperature Pulsed Nitrogen Plasma. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014, v. 8, no. 4, p. 814–820.
19. Дидык А.Ю., Бехтерев В.А., Куликаускас В.С., Серушкин С.В., Никулин В.Я., Силин П.В., В. Белоус В., Васяк Я., Хаевска Е. 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.
20. Ivanov L.I., Dedyurin A.I., Borovitskaya I.V., Krokhin O.N., Nikulin V.Ya., Polukhin S.N., Tikhomirov A.A., Fedotov A.S. Application of plasma focus installations for a study of the influence of deuterium cumulative flows on materials. *Pramana — Journal of Physics*, 2003, v. 61, no. 6, p. 1179 – 1185.
2. Fortov V.E. *Extremalnie sostoyaniya veshstva* [Extreme states of matter]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010, 304 p.
3. Gribkov V.A. *Enciklopediya nizkotemperaturnoi plazmi. Seriya B, spravochne prilozheniya, banki danih, T. IX-3* [Encyclopedia of low-temperature plasma. Serie B, reference applications, databases, V. IX-3, edited by VA Gribkov V.A.]. Moscow, Yanus-K Publ., 591 p.
4. Ivanov L.I., Pimenov V.N., Gribkov V.A. Vzaimodeistvie moshnih impulsnih potokov energii s materialami [The interaction of high-power pulsed energy flows materials]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment (in Rus)*, 2009, no. 1, pp. 23 – 37.
5. Antonova L.K., Borovitskaya I.V., Gorshkov P.V., et al. Vozdeistvie udarnih voln na tokonesyshe svoystva VTSP lenty YBCO(123). [Effect of shock waves on the current-carrying properties of HTSC YBCO(123) tape]. *Doklady Fiziki — Doklady Physics*, 2009, vol. 54, no. 10, pp. 463 – 465.
6. Volobuev I.V., Gorbunov D.N., Granatkin B.N., Isakov A.I. Detektory dlya neitronov iz korotkojivushei plazmy [The detectors for the neutrons from the short-lived plasma]. *Proceedings of the Lebedev Physical Institute, Moscow, Nauka Publ.*, 1977, vol. 94, pp. 1 – 28.
7. Krokhin O.N., Nikulin V.Y., Volobuev I.V. Compact activation detectors for measuring of absolute neutron yield generated by powerful pulsed plasma installations. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2004, vol. 54, no. 1, pp. 359 – 364.
8. Didyk A.Yu. Anomalous deep penetration of hydrogen and deuterium into a sandwich of two niobium foils and deuterium polyethelene (CD₂)_n under action of pulse high temperature hydrogen plasma. *J. Part. Nucl. Lett.*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 186 – 191.
9. Didyk A.Yu. Anomalous deep penetration of hydrogen in niobium at high temperature exposure pulses of hydrogen plasma. *J. Part. Nucl. Lett.*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 253 – 258.
10. Bokshtein B.S. *Diffuziya v metallah* [Diffusion in metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978, 248 p.
11. Zel'dovich Ya.B. and Reiser Yu.P. *Fizika udarnih voln i vysokotemperaturnih gidrodinamicheskikh yavlenii* [Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 1963, 632 p.
12. Velikovich A.L., Liberman M.A. *Fizika udarnih voln v gazah i plazme* [Physics of shock waves in gases and plasmas]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 295 p.
13. Blazer G.A., Krivobokov V.P. Pashchenko O.V. Teplo-massoperenos v tverdom tele pri vozeistvii moshnih puchkov zaryajennih chastic [Heat and mass transfer in solids under the influence of powerful beams of charged particles]. *Novosibirsk, Siberian Academy of Sciences Publishing House*, 1999, 176 p.
14. Didyk A.Yu., Borovitskaja I.V., Wisniewski R. et al. Storage of deuterium and hydrogen in Ni-foils under influence of high temperature deuterium plasma. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, no. 3, pp. 22-26.

References

1. Fortov V.E. *Extremalnie sostoyaniya veshstva na zemle i v kosmose* [Extreme states of matter on Earth and in space]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008, 264 p.

15. Didyk A.Yu., Wisniewski R., Ivanov L.I. et al. Transport of hydrogen in Nb-foil set under action of high temperature hydrogen plasma at «Plasma Focus» set up. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2013, vol. 9, no. 8, pp. 1-5.
16. Didyk A.Yu., Wisniewski R. Properties of hydrogen and its isotopes under high pressure, and technological applications. Dubna, JINR, 2013, 320 p.
17. Didyk A.Yu., Hajewska E., Hofman A., Kulikauskas V.S., Serushkin S.V. Raspredeleniya deiteriya i vodoroda v sborke Ta|CD₂|Ta folg pri vozdeistvii visokotemperaturnoi azotnoi plazmi. Poverhnost. Rentgenovskie, sinhrotronnie i neutronnie issledovaniya [The distributions of hydrogen and deuterium in the assembly Ta|CD₂|Ta foils when exposed to high-temperature nitrogen plasma]. Poverhnost. Rentgenovskie, sinhrotronnie i neutronnie issledovaniya — Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques, 2014, no. 8, pp. 87 – 94.
18. Didyk A.Yu., Hajewska E., Hofman A., Kulikauskas V.S. and Serushkin S.V. Deuterium and hydrogen distribution in a stack of Ta|(CD₂)_n|Ta foils under the action of high temperature pulsed nitrogen plasma]. Poverhnost. Rentgenovskie, sinhrotronnie i neutronnie issledovaniya — Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 814 – 820.
19. Didyk A.Yu., VA Bekhterev V.A., Kulikauskas V.S., Serushkin S.V., Nikulin V.Ja., Silin P.V., Belous W., Vasjak Ya, Hajewska E. Raspredelenie vodoroda i deiteriya v folgah iz volframa, obluchennih deiterievoy visokotemperaturnoi plazmoi v zapolnennih H₂O i D₂O germetichnih kamerah. [The distribution of hydrogen and deuterium in tungsten foils irradiated with deuterium-filled high-temperature plasma in H₂O and D₂O sealed chamber]. Poverhnost. Rentgenovskie, sinhrotronnie i neutronnie issledovaniya — Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques, 2015, no. 8, pp. 1 – 9.
20. Ivanov L.I., Dedyurin A.I., Borovitskaya I.V., Krokhin O.N., Nikulin V.Ya., Polukhin S.N., Tikhomirov A.A., Fedotov A.S. Application of plasma focus installations for a study of the influence of deuterium cumulative flows on materials. Pramana — Journal of Physics, 2003, vol. 61, no. 6, pp. 1179 – 1185.

Статья поступила в редакцию 21.04.2015 г.

Дидык Александр Юрьевич — Объединенный институт ядерных исследований (Россия, 141980, Московская область, г. Дубна, ОИЯИ, ул. Жолио-Кюри, д. 6), ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, специалист по радиационной физике твердого тела. E-mail: didyk@jinr.ru.

Ерискин Александр Александрович — Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20), аспирант, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН), инженер, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: subzerno@gmail.com.

Бондаренко Геннадий Германович — Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20), профессор, доктор физико-математических наук, специалист в области физики конденсированного состояния E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Боровицкая Ирина Валерьевна — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: symp@imet.ac.ru.

Куликаускас Вацлав Станиславович — Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова (Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2), заведующий лабораторией НИИЯФ МГУ, кандидат физико-математических наук, специалист в области радиационных методов исследования материалов. E-mail: vaclav@anna19.sinp.msu.ru.

Никулин Валерий Яковлевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН), заведующий лабораторией ФИАН, доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31), профессор, специалист в области физики плазмы. E-mail: vnik@lebedev.ru.

Силин Павел Викторович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Россия, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области физики плазмы. E-mail: silip@mail.ru.

Волобуев Игорь Владимирович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН), старший научный сотрудник, специалист в области физики плазмы. E-mail: volobuev@sci.lebedev.ru.

Белоус Вальдемар — Национальный центр ядерных исследований (Польша, 05400, г. Отвоцк, ул. Анджеев Солтана, д. 6), ведущий научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: w.bilous@cyf.gov.pl.

Васяк Ян — Национальный центр ядерных исследований (Польша, 05400, г. Отвоцк, ул. Анджеев Солтана, д. 6), ведущий научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: wasiak@cyf.gov.pl.

Хаевска Ева — Национальный центр ядерных исследований (Польша, 05400, г. Отвоцк, ул. Анджеев Солтана, д. 6), директор департамента исследования материалов, специалист в области радиационного материаловедения. E-mail: hajewska@cyf.gov.pl.

Influence of shock waves generated by high temperature argon plasma on the redistribution of hydrogen and deuterium in the assemblies of tantalum and niobium foils

A. Yu. Didyk, A. A. Eriskin, G. G. Bondarenko, I. V. Borovitskaya, V. S. Kulikauskas, V. Ya. Nikulin, P. V. Silin, I. V. Volobuev, W. Belous, Ya. Wasyak, E. Hajewska

The paper presents the results of the study of the redistribution of hydrogen and deuterium in assemblies of metallic foils Ta|CD₂|Ta, Ta|Ta|CD₂|Ta|Ta and Nb|CD₂|Nb which were irradiated by pulses of high temperature argon plasma, created by plasma focus installation. Irradiated samples of foils were investigated by detection of recoil nuclei of hydrogen and deuterium (ERDA). It was found ultra deep penetration of light gas impurities (hydrogen and deuterium) in the target. It is assumed that this phenomenon is due to the influence of shock waves generated by a plasma pulse, and acceleration of diffusion processes.

Key words: plasma focus, hightemperature pulsed argon plasma, diffusion, redistribution of hydrogen and deuterium, niobium, tantalum, Nb, Ta, shock waves, powerful energy flows.

Didyk Aleksandr — Joint Institute for Nuclear Research (Russia, 141980, Moscow region, Dubna, JINR, Joliot-Curie 6), leading researcher, Dr Sci (phys-math), expert in radiation physics of solids. E-mail: didyk@jinr.ru.

EriskinAleksandr — National Research University Higher School of Economics (Russia, 101000, Moscow, Myasnitskaya 20), PhD, student in Condensed matter physics of Russian academy of sciences. Lebedev Physical Institute, RAS (119991, Moscow, Leninskii pr. 53, LPI), engineer, specialist in the field of radiation material. E-mail: subzerno@gmail.com.

BondarenkoGennadii — National Research University Higher School of Economics (Russia, 101000, Moscow, Myasnitskaya 20), professor, Dr Sci. (phys math), specialist in condensed matter physics. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Borovitskaya Irina — A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Material Science, RAS (Russia, 119991, Moscow, Leninskii pr. 49), senior researcher, PhD (phys-math), specialist in the field of radiation material. E-mail: symp@imet.ac.ru.

KulikauskasVatslav — D.V.Skobeltsyn Scientific Institute of Nuclear Physics, Moscow State University (Russia, 119991, Moscow, Lenin hills 1, building 2), head of laboratory SINP, PhD (phys-math), expert in the field of radiation research methods of materials. E-mail: vaclav@anna19.sinp.msu.ru.

NikulinValerii — The P.N. Lebedev Physical Institute, RAS (119991, Moscow, Leninskii pr. 53, LPI), head of laboratory of LPI, Dr Sci (phys-math), expert in the field of plasma physics. National Research Nuclear University “MEPhI” (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway 31), professor. E-mail: vnik@lebedev.ru.

Silin Pavel — Lebedev Physical Institute, RAS (119991, Moscow, Leninskii pr. 53, LPI), senior researcher, PhD (phys-math), expert in the field of plasma physics. E-mail: silip@mail.ru.

Volobuev Igor — Lebedev Physical Institute, RAS (119991, Moscow, Leninskii pr. 53, LPI), senior researcher, expert in the field of plasma physics. E-mail: volobuev@sci.lebedev.ru.

BilousWaldemar — National Centre for Nuclear Research (Poland, 05400, Otwock city, ul. AndrzejaSoltana 6), AGV 767407, PhD, main specialist, specialist in the field of radiation material. E-mail: w.bilous@cyf.gov.pl.

Wasiak Jan — National Centre for Nuclear Research (Poland, 05400, Otwock city, ul. AndrzejaSoltana 6), ACN 087411, PhD, main specialist, specialist in the field of radiation material. E-mail: wasiak@cyf.gov.pl.

Hajewska Ewa — National Centre for Nuclear Research (Poland, 05400, Otwock city, ul. AndrzejaSoltana 6), AUX 572227, PhD, director of the department of materials research, specialist in the field of radiation material. E-mail: hajewska@cyf.gov.pl.