

УДК 539.1

## ИЗЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ КВАНТОВ, НЕЙТРОНОВ И ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РЕНТГЕНОВСКОМ ОБЛУЧЕНИИ ДЕЙТЕРИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

© 2019 г. О. Д. Далькаров<sup>1</sup>, М. А. Негодаев<sup>1</sup>, А. С. Русецкий<sup>1, \*</sup>, В. И. Цехош<sup>1</sup>, Б. Ф. Ляхов<sup>2</sup>, Е. И. Саунин<sup>2</sup>, А. А. Болотоков<sup>3</sup>, И. А. Кудряшов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071 Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО “Амтертек”, 125459 Москва, Россия

<sup>4</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

\*E-mail: rusets@lebedev.ru

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

После доработки 07.07.2018 г.

Принята к публикации 07.07.2018 г.

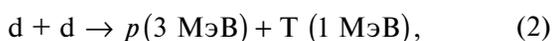
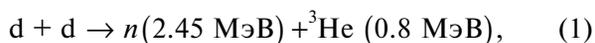
Проведены исследования излучения рентгеновских квантов, нейтронов и заряженных частиц во время рентгеновского облучения дейтерированных структур. Мишени (дейтерированные CVD-алмаз, палладий, цирконий и титан) облучались с использованием рентгеновской трубки с энергией до 30 кэВ, снабженной поликапиллярной линзой, а также рентгеновской трубки с энергией до 25 кэВ, снабженной коллиматором. Использовали различные типы детекторов: многоканальный детектор нейтронов на основе счетчиков He-3, пластиковый трековый детектор CR-39 и кремниевые поверхностно-барьерные детекторы. Было обнаружено излучение нейтронов с энергией выше 10 МэВ и излучение альфа-частиц в области энергий 7–15 МэВ. Этот результат указывает на возможность стимулирования многочастичных реакций слияния ядер дейтерия в твердых дейтерированных структурах. Анализ спектров рентгеновской флуоресценции показал наличие “дополнительных” пиков, которые не идентифицируются ни по одной из линий характеристического излучения. Их внешний вид не может быть связан с каким-либо известным элементом, а также с процессами дифракции. Природа появления “дополнительных” пиков требует отдельного исследования.

**Ключевые слова:** ядерные реакции, взаимодействие излучения с веществом, ускоритель ионов, детектор нейтронов, полупроводниковый детектор, протоны, нейтроны, альфа-частицы, рентгеновская трубка.

DOI: 10.1134/S0207352819040036

### ВВЕДЕНИЕ

В серии наших предыдущих работ сообщалось о возможности стимулирования DD-реакций:

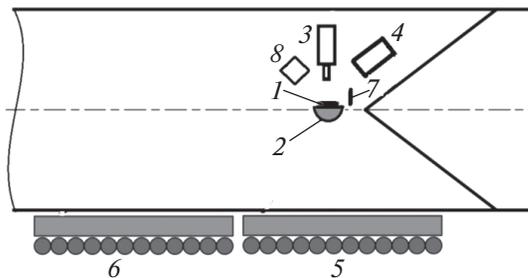


в твердотельных дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов с энергией 20–30 кэВ [1], а также о появлении в рентгеновских спектрах флуоресценции от мишеней при бомбардировке их пучками ионов “дополнительных” пиков, появление которых нельзя ассоциировать ни с одним из известных элементов [2]. Еще ранее была показана возможность протекания DD-реакции стимулированной в дейтерированных мишенях Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> пучками электронов и рентгеновских квантов [3].

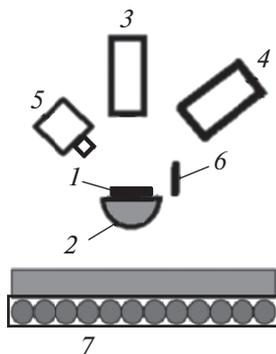
В данной работе мы продолжили исследование выходов продуктов ядерных реакций при облучении дейтерированных структур пучком рентгеновских квантов с использованием трековых детекторов и полупроводниковых детекторов заряженных частиц. Кроме того, были получены новые данные по спектрам флуоресценции и обнаружены “дополнительные” пики при облучении рентгеновскими квантами мишеней с ярко выраженной текстурой (дейтерированный CVD-алмаз и палладий). Установлено отсутствие “дополнительных” пиков для мишеней с гомогенной структурой без выделенных направлений (дейтерированный графит и титан).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Общая схема эксперимента в первой серии измерений приведена на рис. 1. Исследуемый образец помещался на медный держатель, позволяв-



**Рис. 1.** Схема эксперимента по облучению мишеней рентгеновскими квантами в первой серии измерений. Мишень (1), медный держатель мишени (2), рентгеновская трубка с анодом из Сг (3), детектор рентгеновского излучения фирмы АМРТЕК (4), нейтронные детекторы на основе счетчиков He-3 (5, 6), трековый детектор CR-39 (7), кремниевый полупроводниковый детектор (8).



**Рис. 2.** Схема эксперимента по облучению мишеней рентгеновскими квантами во второй серии измерений. Мишень (1), медный держатель мишени (2), кремниевые полупроводниковые детекторы (3, 4), рентгеновская трубка с анодом из Fe (5), трековый детектор CR-39 (6), нейтронный детектор на основе He-3 счетчиков (7).

ший поворачивать мишень, и облучался пучком рентгеновских квантов с помощью рентгеновской трубки с анодом из Сг. Острофокусная рентгеновская трубка моноблочной конструкции фирмы ООО «ИФО» была снабжена поликапиллярной полулинзой. Диаметр фокального пятна на образце составлял примерно 2.5 мм. Поток фотонов у острофокусной трубки с Сг-анодом был равен примерно  $1.2 \times 10^5$  фотонов/с на  $1 \text{ мм}^2$ .

Общая схема эксперимента во второй серии измерений приведена на рис. 2. Исследуемый образец помещался на медный держатель, позволявший поворачивать мишень, и облучался пучком рентгеновских квантов с помощью рентгеновской трубки БС-17 «Светлана» с анодом из Fe, моноблочной конструкции, снабженной коллиматором. Диаметр фокального пятна на образце составлял примерно 3 мм. Поток фотонов у трубки с Fe-анодом составлял примерно  $3 \times 10^4$  фотонов/с на  $1 \text{ мм}^2$ .

Для регистрации рентгеновского излучения использовали кремниевый полупроводниковый детектор фирмы АМРТЕК (XR-100CR Spectrometer). Калибровка детектора проводилась с помощью источника рентгеновских квантов Fe-55 а также по известным линиям характеристического излучения. Для детектирования нейтронов продуктов DD-реакции использовали нейтронные детекторы на основе счетчиков He-3 СНМ-18. Для детектирования нейтронов и протонов продуктов DD-реакций применялся трековый детектор CR-39. Для детектирования протонов и альфа-частиц применяли кремниевые полупроводниковые детекторы. Калибровку полупроводниковых детекторов проводили с помощью источника альфа-частиц Pu-239.

Измерения нейтронной эмиссии выполняли с помощью детектора на основе счетчиков H-3 СНМ-18, снабженных парафиновым радиатором. Детектор состоял из двух групп счетчиков по 12 счетчиков в каждой, расположенных на разных расстояниях от мишени. Эффективности детектирования нейтронов с источником Cf-252, помещенном на место мишени, составили для ближней и дальней от мишени групп счетчиков  $7 \times 10^{-4}$  и  $6.5 \times 10^{-5}$ , соответственно. Фоновые измерения выполняли без дейтерированной мишени при включенной рентгеновской трубке, облучавшей медную подложку.

Калибровка детектора CR-39 была проведена с помощью протонного пучка ускорителя Ван де Граафа ( $E_p = 0.75\text{--}3.0$  МэВ), стандартных  $\alpha$ -источников ( $E_\alpha = 2\text{--}7.7$  МэВ) и пучка циклотрона ( $E_\alpha = 8\text{--}30$  МэВ) в НИИЯФ МГУ. После облучения детекторы травились в растворе 6 М NaOH в H<sub>2</sub>O при 70°C в течение 7 ч. Исследования треков проводили на оптическом микроскопе МБИ-9 снабженном ССD-камерой. Подробно калибровка трековых детекторов CR-39 описана в работе [4]. Согласно калибровочным измерениям протоны с энергией 1–3 МэВ имеют диаметры треков 5–7 мкм.

Образцы CVD-алмаза толщиной 400 мкм были выращены в плазмохимическом реакторе с СВЧ-разрядом УПСА-100 (частота 2.45 ГГц, СВЧ мощность до 5 кВт) в газовых смесях CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> [5]. В выбранных условиях полученные алмазные пленки имели черный цвет из-за многочисленных структурных дефектов в кристаллитах, таких как двойники и аморфизованные области размером порядка 1 нм. В литературе для подобного материала принято обозначение black diamond.

Дейтерированные кристаллические структуры палладия Pd/PdO:D<sub>x</sub>, аналогичные тем, которые использовались для исследования выходов DD-реакции при низкой энергии [6, 7], изготавливались по следующей методике. Образцы Pd/PdO были получены термическим окислением из фольги Pd (чистота 99.95%) толщиной 50 мкм с размерами  $S = 30 \times 10 \text{ мм}^2$ . Толщина оксидной

пленки на поверхности составляла около 40 нм. Электрохимическая нагрузка дейтерием проводилась перед облучением в растворе 0.3 М LiOD в D<sub>2</sub>O с анодом из Pt, плотность тока составляла 10 мА/см<sup>2</sup>,  $x = D/Pd \sim 0.73$  (требуется около 40 мин). Отдельные образцы Pd/PdO:D<sub>x</sub> электролитически покрывались слоем Cd толщиной 1.5 мкм для предотвращения выхода дейтерия из образца. Затем образцы устанавливались в держателе и облучались рентгеновским пучком.

Образцы дейтерированных структур титана Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, аналогичные тем, которые использовались для исследования выходов DD-реакции при низкой энергии [8, 9], изготавливались по следующей методике. Фольги Ti толщиной 30, 55 и 300 мкм подвергались электролизу в 0.2-М-растворе D<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в D<sub>2</sub>O в течение  $t = 36$  ч при плотности тока  $J = 10$  мА/см<sup>2</sup>, чтобы растворить оксидный слой TiO<sub>2</sub> на поверхности Ti и обеспечить проникновение дейтерия в образец. Средняя нагрузка ( $x = D/Ti = 0.1$  на глубине  $\sim 1$  мкм) была определена по весовому балансу. Насыщение образца может быть проведено задолго до облучения, потому что соединение абсолютно устойчиво при  $T = 300$  К.

Дейтерированные структуры текстурированного CVD-алмаза и палладия насыщались путем электролиза в 0.3-М-растворе LiOD в D<sub>2</sub>O с анодом из Pt. Образцы использовались в качестве катода. Измерения по току электролиза и по приращению массы образца показали, что в образцы CVD-алмаза за время электролиза входило до  $\sim 10^{20}$  атомов дейтерия. Данные работы [3] показывают, что после эксперимента в образцах Pd/PdO:D<sub>x</sub> концентрация дейтерия составляла  $\sim 10^{21}$  атомов/см<sup>3</sup>.

Методика формирования образцов покрытий из дейтеридов циркония заключалась в распылении циркония в дейтерий-содержащей плазме и осаждении покрытия на подложки, перемещающиеся относительно потоков плазмы до суммарной толщины пленки 1–1.5 мкм [10]. Скорость перемещения подложки составляла  $5 \times 10^{-2}$  м · с<sup>-1</sup>. Для синтеза дейтерида циркония использовали плазмообразующий газ, содержащий 20 об. % водорода (дейтерия) и 80 об. % плазмообразующего газа – аргона. Толщина покрытия (в мкг/см<sup>2</sup>) рассчитывалась по увеличению массы достаточно большого по площади образца, приходящейся на единицу его площади.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Был проведен анализ спектров рентгеновской флуоресценции мишеней, облученных пучком рентгеновских квантов. При облучении мишеней из дейтерированного CVD-алмаза и палладия (рис. 3 и 4) появляются “дополнительные” пики, которые не идентифицируются ни по одной из

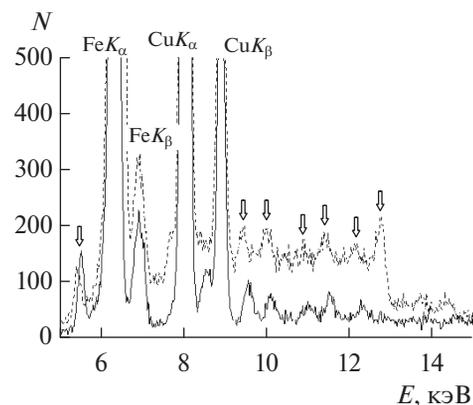


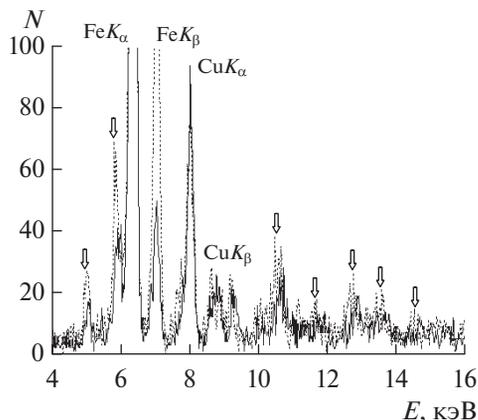
Рис. 3. Спектр рентгеновской флуоресценции мишени дейтерированного CVD-алмаза (подложка Cu) при разных углах между мишенью, трубкой и детектором. Угол между плоскостью мишени и трубкой 100°, угол между плоскостью мишени и детектором 45° (сплошная линия). Угол между плоскостью мишени и трубкой 100°, угол между плоскостью мишени и детектором 55° (пунктирная линия). “Дополнительные” пики показаны стрелками.

серий характеристического излучения. Энергии и интенсивности неизвестных пиков приведены в табл. 1. Видно, что для разных материалов положение этих пиков различаются.

В то же время, на спектрах от дейтерированного титана и графита “дополнительные” пики отсутствуют. Можно предположить, что появление в спектрах “дополнительных” пиков связано со структурой материала облучаемой мишени. Например, CVD-алмаз обладает ярко выраженной текстурой [2] с четко выделенным направлением. Образцы дейтерированного палладия имеют пористую структуру поверхности [3]. Поры имеют характерные размеры от 100 до 1000 нм и расположены перпендикулярно облучаемой поверхности. В то же время образцы дейтерированного титана или графита имеют гомогенную структуру без выделенных направлений.

Пики, которые не идентифицируются, присутствуют практически на всех спектрах от мишени дейтерированного CVD-алмаза и палладия, первоначально были определены как дифракционные пики. Такие дифракционные пики должны изменять свое положение при изменении угла между рентгеновской трубкой и детектором.

Были проведены дополнительные измерения, при которых облучение мишени проводилось под разными углами между плоскостью мишени, трубкой и детектором (рис. 3 и 4). Как показал анализ спектров мишеней, полученных при облучении их пучком рентгеновских квантов под разными углами, положение этих пиков не меняется и, следовательно, это не дифракционные пики. Анализ спектров рентгеновского излучения показал, что “дополнительные пики” не могут быть результатом наложения двух фотонов характеристических линий элементов, поскольку скорость



**Рис. 4.** Спектр рентгеновской флуоресценции мишени дейтерированного палладия при разных углах между мишенью, трубкой и детектором. Угол между мишенью и трубкой  $100^\circ$ , угол между мишенью и детектором  $45^\circ$  (сплошная линия). Угол между мишенью и трубкой  $100^\circ$ , угол между мишенью и детектором  $55^\circ$  (пунктирная линия). “Дополнительные” пики показаны стрелками.

счета в области пиков характеристических линий не превышала  $10 \text{ с}^{-1}$ . Также было показано, что “дополнительные пики” не являются “пиками вылета” (escape pikes).

Таким образом, вопрос о природе “дополнительных” пиков в рентгеновских спектрах от кристаллических мишеней при их облучении пучком рентгеновских квантов остается открытым. От

**Таблица 1.** Положение и интенсивности “дополнительных пиков”

Образец	Энергия квантов “дополнительных” пиков, кэВ	Интенсивность, $\text{с}^{-1}$
Дейтерированный CVD-алмаз	9.76	2.7
	10.64	2.3
	11.13	2.9
	11.85	1.9
	12.32	1.5
	12.99	0.6
	14.02	1.3
	14.45	0.8
PdD <sub>x</sub>	6.96	0.3
	7.58	0.7
	8.06	1.3
	8.54	1.6
	9.06	1.5
	10.38	2.5
	11.50	1.1
	12.47	1.0
	13.23	1.6

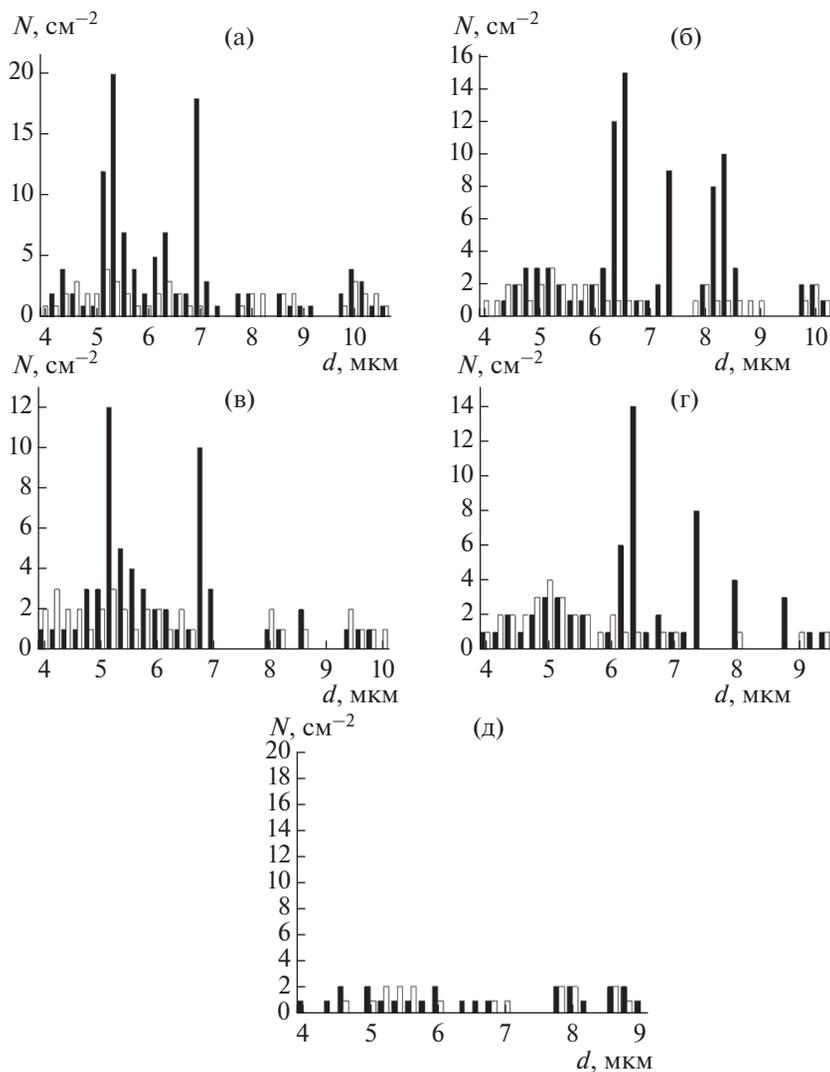
метим также, что измерения проводились на воздухе, что внесло некоторые искажения в спектры рентгеновского излучения при облучении мишени и регистрации флуоресценции.

Одновременно исследовалась эмиссия нейтронов продуктов DD-реакции (1) стимулированной в дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов. Измерения нейтронной эмиссии проводились детектором на основе He-3 счетчиков СМ-18. Фоновые измерения проводились без дейтерированной мишени при включенной рентгеновской трубке, облучавшей медную подложку. Подробно результаты измерения нейтронной эмиссии детектором на основе He-3 счетчиков описаны в работе [1]. Сравнение с фоновыми измерениями показывает, что при наличии дейтерированной мишени среднее значение счета нейтронного детектора превышает фон. С учетом эффективности детектирования это дает средний поток нейтронов  $\sim 10^2$  нейтронов/с в  $4\pi$  ср. Также в отдельные моменты времени превышает на  $3\sigma$  средний фон, что указывает на наличие “нейтронных вспышек” ( $\sim 10^4$  нейтронов/с в  $4\pi$  ср), стимулированных рентгеновским излучением. Процент таких превышений  $3\sigma$ -фона для дейтерированных мишеней значительно превышает значения для распределения Пуассона, описывающего распределение отсчетов для фоновых значений.

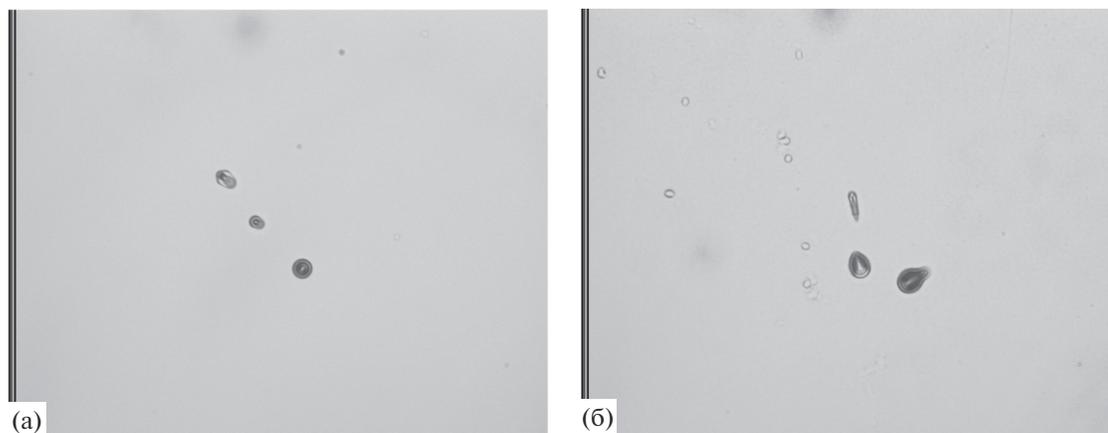
Для регистрации протонов продуктов DD-реакции, стимулированной в дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов, использовались трековые детекторы CR-39, расположенные на расстоянии 3 см от мишени. Детекторы имели покрытие 11 и 44 мкм из Al.

На рис. 5 показаны распределения диаметров треков на детекторах CR-39 с покрытием 11 и 44 мкм Al при облучении мишеней ZrD<sub>1.5</sub> и TiD<sub>x</sub>, а также фонового детектора. Облучение мишеней проводилось рентгеновскими квантами с энергией 30 кэВ при помощи рентгеновской трубки с анодом из Сг. Нейтроны от реакции (1) могут дать треки протонов отдачи как на передней, так и на обратной сторонах детектора, в то время как протоны от реакции (2) оставляют треки только на передней стороне детектора. Согласно данным калибровки протоны имеют диаметры треков  $d < 7$  мкм. Крайний левый пик на распределениях диаметров треков на передней стороне детекторов на рис. 6 (при  $5 < d < 7$  мкм) может быть связан с эмиссией протонов от реакции (2) с начальной энергией 3 МэВ. В то же время на распределениях присутствуют пики с диаметрами  $7 < d < 10$  мкм. Они могут быть связаны с альфа-частицами с энергией  $4 < E_\alpha < 14$  МэВ. С учетом покрытия детекторов и расстояния до мишени, можно предположить, что из мишени испускались альфа-частицы с энергией  $7 < E_\alpha < 15$  МэВ.

Потоки заряженных частиц, испущенных из мишени, можно оценить по разнице показаний передней и обратной сторон трекового детектора.



**Рис. 5.** Распределения диаметров треков на передней (темные столбцы) и обратной (светлые столбцы) сторонах детектора CR-39 при облучении мишеней  $\text{ZrD}_{1.5}$ , время экспозиции – 4.5 ч (покрытие детектора 11 мкм Al (а) и 44 мкм Al (б));  $\text{TiD}_x$ , время экспозиции – 2 ч (покрытие детектора 11 мкм Al (в) и 44 мкм Al (г)) и фонового детектора (д).



**Рис. 6.** Микрофотографии поверхности детектора CR-39 с распадом ядра  $^{12}\text{C}$  на три альфа-частицы. Размер изображения  $120 \times 90$  мкм.

Таблица 2. Данные детектора CR-39

Мишень	Энергия пучка, кэВ	Ток пучка, мкА	Время экспозиции, с	Расстояние от мишени до детектора, см	Средний поток протонов, $\langle n_p \rangle$ , с <sup>-1</sup> в 4π ср	Средний поток альфа-частиц ( $E_\alpha > 10$ МэВ) $\langle n_p \rangle$ , с <sup>-1</sup> в 4π ср	Средний поток нейтронов, $\langle n_n \rangle$ , с <sup>-1</sup> в 4π ср
PdD <sub>x</sub>	20–30	20–40	3000	2	4.7	0.9	120
PdD <sub>x</sub> Cd	20–30	20–50	2000	2	4.5	1	160
ZrD <sub>1.5</sub>	20–30	20–100	1200	2	4	2.3	200
ZrD <sub>1.5</sub>	30	60	16200	3	2.5	1.2	40
TiD <sub>x</sub>	30	60	7200	3	2.2	1.8	156

В то же время поток быстрых нейтронов, зарегистрированных через протоны отдачи, можно оценить по разнице показаний обратных сторон рабочих и фоновых детекторов. Сводные данные по средним потокам заряженных частиц и нейтронов, зарегистрированных детекторами CR-39, представлены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что средние потоки нейтронов при облучении дейтерированных мишеней потоками рентгеновских квантов находятся на уровне  $\sim 10^2$  п/с в 4π ср. Эта величина хорошо согласуется со средними потоками нейтронов, зарегистрированными детектором на основе He-3 счетчиков.

Помимо треков от первичных заряженных частиц на трековых детекторах обнаружены события, когда 2 или 3 трека выходят из одной точки (рис. 6). Такие события можно ассоциировать с распадами ядер <sup>12</sup>C и <sup>16</sup>O, которые входят в состав трекового детектора CR-39, под действием быстрых нейтронов. В табл. 3 приведены реакции, которые производят нейтроны с ядрами <sup>1</sup>H, <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O, входящими в состав материала детектора CR-39. Реакции с распадом ядер являются пороговыми и дают указание на испускание из мишени нейтронов с энергией более 10 МэВ.

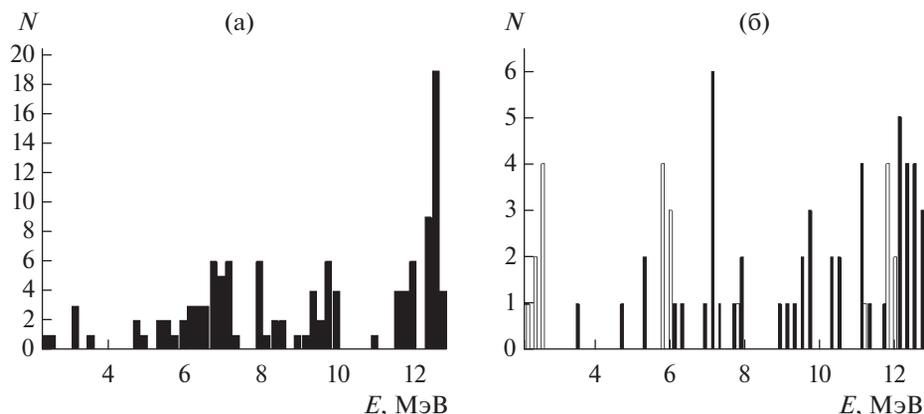
Эмиссия заряженных частиц при облучении дейтерированных мишеней потоками рентгеновских квантов исследовалась также с помощью кремниевых поверхностно-барьерных детекторов. На рис. 7 приведены энергетические спектры заряженных частиц от мишеней ZrD<sub>1.5</sub> и TiD<sub>x</sub>, облученных рентгеновскими квантами с энергией 30 кэВ. На спектрах видно, что в данном измере-

нии основная часть заряженных частиц имеет энергию 4–14 МэВ. Они могут быть ассоциированы с альфа-частицами, также зарегистрированными трековыми детекторами. Некоторый дефицит в спектрах событий с энергией меньше 3 МэВ, которые ассоциируются с протонами от DD-реакции (2), может быть объяснен высоким порогом детектирования  $\sim 1$  МэВ. В фоновых измерениях, проведенных как с мишенью, так и без нее, также присутствуют события с энергией 4–12 МэВ, однако их интенсивность примерно в 25 раз меньше, чем при облучении мишеней рентгеновскими квантами.

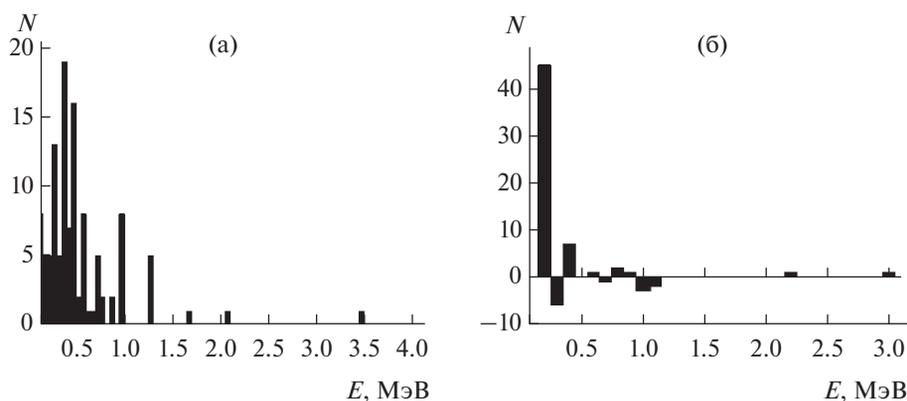
Во второй серии измерений эмиссия заряженных частиц при облучении дейтерированных мишеней потоками рентгеновских квантов исследовалась с помощью пары кремниевых поверхностно-барьерных детекторов с покрытиями 11 и 44 мкм Al. На рис. 8 приведены энергетические спектры заряженных частиц от мишеней дейтерированного CVD-алмаза и титана TiD<sub>x</sub>, облученных рентгеновскими квантами с энергией 25 кэВ. При этом использовалась рентгеновская трубка с анодом из Fe моноблочной конструкции, снабженной коллиматором. Диаметр фокального пятна на образце составлял примерно 3 мм. Поток фотонов у трубки с Fe-анодом составляет примерно  $3 \times 10^4$  фотонов/с на 1 мм<sup>2</sup>, что примерно в четыре раза меньше потока фотонов для трубки, снабженной линзой. Из спектров, представленных на рис. 9 видно, что основная часть заряженных частиц имеет энергию меньше, чем 1.5 МэВ. С учетом покрытий детекторов и расстояний до мишени эти частицы могут быть ассоциированы с протонами от DD-реакции (2), средний поток которых может быть оценен как  $\sim 10$  с<sup>-1</sup> в 4π ср. Эта величина хорошо согласуется со средними потоками протонов, зарегистрированными детектором CR-39 (табл. 2). Некоторый сдвиг спектров на рис. 8 и 9 в сторону меньших энергий по сравнению со спектрами на рис. 7 может быть объяснен использованием более толстых мишеней, чем в первой серии (например, дейтерированного CVD-алмаза толщиной 400 мкм), кото-

Таблица 3. Основные реакции, вызванные нейтронами в детекторе CR-39

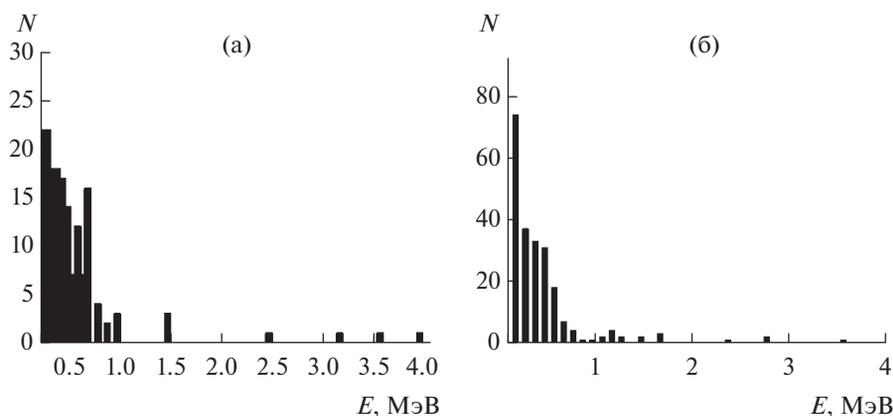
Реакция	Сечение реакции, мб	Порог реакции, МэВ
<sup>1</sup> H( <i>n</i> , <i>n</i> ) <sup>1</sup> H	~750	Упругое рассеяние
<sup>12</sup> C( <i>n</i> , α) <sup>8</sup> Be	62 ± 15	5.8
<sup>16</sup> O( <i>n</i> , α) <sup>12</sup> C	~150	3.1
<sup>12</sup> C( <i>n</i> , <i>n</i> )3α	202 ± 30	9.6



**Рис. 7.** Энергетические спектры заряженных частиц от мишеней, облученных рентгеновскими квантами с энергией 25–30 кэВ. Мишень  $ZrD_{1,5}$  (а) и  $TiD_x$  (б). Детектор без покрытия (темные столбцы), покрытие Al 22 мкм (светлые столбцы). Расстояние до детектора – 3 см.



**Рис. 8.** Энергетические спектры заряженных частиц от мишени  $TiD_x$  облученной рентгеновскими квантами с энергией 25 кэВ. Приведена разница показаний детекторов с мишенью и без нее при включенной рентгеновской трубке за время измерения 9000 с. Расстояние от детектора до мишени – 5 см воздуха. Покрытие детекторов Al 11 мкм (а) 44 мкм (б).



**Рис. 9.** Энергетические спектры заряженных частиц от мишени дейтерированного CVD-алмаза облученной рентгеновскими квантами с энергией 25кэВ. Приведена разница показаний детекторов с мишенью и без нее при включенной рентгеновской трубке за время измерения 10800 с. Расстояние от детектора до мишени – 4.5 см воздуха. Покрытие детекторов Al 11 мкм (а) 44 мкм (б).

рые привели к большим потерям энергии заряженных частиц.

Наличие в спектрах заряженных частиц событий с энергией, превышающей 3 МэВ, может быть объяснено протеканием в мишенях не толь-

ко обычной DD-реакции (2), но и реакций слияния нескольких ядер дейтерия с образованием высокоэнергичных альфа-частиц. Эмиссия нейтронов с энергией более 10 МэВ также дает указание на возможность стимуляции многочастич-

ных реакций слияния ядер дейтерия в твердых дейтерированных структурах [11].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При бомбардировке дейтерированных кристаллических мишеней пучками рентгеновских квантов с энергией 20–30 кэВ наблюдается эмиссия нейтронов продуктов DD-реакции со средней интенсивностью  $\sim 10^2 \text{ с}^{-1}$  в 4л ср. Измерения проводились двумя независимыми методами (нейтронным детектором на основе He-3 счетчиков и трековым детектором CR-39). Установлена эмиссия нейтронов с энергией больше 10 МэВ.

Двумя независимыми методами (кремниевым полупроводниковым детектором и трековым детектором CR-39) зарегистрирована эмиссия заряженных частиц со средней интенсивностью  $\sim 10 \text{ с}^{-1}$  в 4л ср. Наличие в спектрах заряженных частиц событий с энергией, превышающей 3 МэВ, может быть объяснено протеканием в мишенях не только обычной DD-реакции (2), но и многочастичных реакций слияния ядер дейтерия с образованием высокоэнергичных альфа частиц [11]. Таким образом, показана возможность стимулирования многочастичных реакций синтеза ядер дейтерия в твердотельных дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов с энергией 20–30 кэВ.

Анализ спектров рентгеновской флуоресценции обнаруживает “дополнительные” пики у мишеней с ярко выраженной текстурой (дейтерированный CVD-алмаз и палладий), которые не идентифицируются ни по одной из линий характеристического излучения. Подобные пики отсутствуют в спектрах от мишеней с гомогенной структурой (дейтерированный титан и графит). Их внешний вид не может быть связан с каким-либо известным элементом, а также с процессами дифракции. Природа появления “дополнительных” пиков требует отдельного исследования.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность В.Г. Ральченко за помощь в изготовлении мишеней CVD-алмаза и Ю.Ж. Тулеушеву за предоставленные мишени дейтерированного циркония. Авторы также благодарны А.В. Огинову и К.В. Шпакову за помощь в проведении экспериментов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Цехош В.И., Ляхов Б.Ф., Саунин Е.И., Болотоков А.А., Тулеушев Ю.Ж. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 2. С. 162.
2. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Цехош В.И., Болотоков А.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 1. С. 363
3. Чернов И.П., Русецкий А.С., Краснов Д.Н., Ларионов В.В., Ляхов Б.Ф., Саунин Е.И., Тюрин Ю.И., Черданцев Ю.П. // ЖЭТФ 2011. Т. 139. № 6. С. 1088.
4. Беляев В.С., Виноградов В.И., Матафонов А.П., Рыбаков С.М., Крайнов В.П., Лисица В.С., Андрианов В.П., Игнатъев Г.Н., Бушуев В.С., Громов А.И., Русецкий А.С., Дравин В.А. // Ядерная физика. 2009. Т. 72. № 7. С. 1123.
5. Ralchenko V.G., Pleuler E., Lu F.X., Sovyk D.N., Bolshakov A.P., Guo S.B., Tang W.Z., Gontar I.V., Khomich A.A., Zavedeev E.V., Konov V.I. // Diam. Relat. Mater. 2012. V. 23. P. 172.
6. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев, Русецкий А.С., Чубенко А.П. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 9. С. 3.
7. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. № 10. С. 15
8. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев, Русецкий А.С., Чубенко А.П. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 12. С. 3
9. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. № 11. С. 3.
10. Bystritsky V.M. Dudkin G.N., Filipowicz M., Tuleushev Yu.Zh., Zhakanbaev E.A. // NIMA. 2016. V. 810. P. 80.
11. Takahashi A. // Current Science. 2015. V. 108. P. 514.

## X-Ray, Neutron and Charged Particle Emission under X-Ray Irradiation of Deuterated Structures

O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, A. S. Rusetskii, V. I. Tsechosh, B. F. Lyakhov,  
E. I. Saunin, A. A. Bolotokov, I. A. Kudryashov

Emission of nuclear reaction products (neutrons and protons) from the deuterated structures of textured CVD-diamond, palladium and zirconium under irradiation beam of X-rays using independent methods (neutron detector based on He-3 counters, Si surface-barrier semiconductor detectors and track detector CR-39) were measured. The possibility of stimulation by the beam of X-rays with an energy of 20–30 keV for multiparticle deuterium fusion reactions in solid deuterated targets was shown. Analysis of X-ray fluorescence spectra of the target bombarded by beams of ions, allowed to find them “additional” peaks, the occurrence of which can not be associated with any of the known elements, and requires separate research.

**Keywords:** nuclear reactions, interaction of radiation with matter, ion accelerator, neutron detector, semiconductor detector, protons, neutrons, alpha particles, X-ray tube.