

P15-2012-50

А. Ю. Дидык, Р. Вишневский*

СИНТЕЗ НОВЫХ СТРУКТУР
В ПЛОТНОМ ГАЗООБРАЗНОМ ДЕЙТЕРИИ
И НАСЫЩЕННОМ ДЕЙТЕРИЕМ ПАЛЛАДИИ
ПРИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ,
ИНДУЦИРОВАННЫХ γ -КВАНТАМИ

Направлено в журнал «Физика и химия обработки поверхности»

*Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

Дидык А. Ю., Вишневецкий Р.

P15-2012-50

Синтез новых структур в плотном газообразном дейтерии и насыщенном дейтерием палладии при ядерных реакциях, индуцированных γ -квантами

Проведены исследования элементного состава образцов палладия, облученного в плотном газообразном дейтерии γ -квантами непрерывного спектра с пороговой энергией 8,8 МэВ. Обнаружены значительные аномалии в структуре облученных образцов и их элементном составе. На обоих концах Pd-проволоки обнаружены значительные изменения с выбросами (типа застывших «солнечных протуберанцев») расплавленного металла со сложным элементным составом. Феноменологическая модель ядерных реакций, приводящих к элементному составу палладия, приведена.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Didyk A. Yu., Wisniewski R.

P15-2012-50

Synthesis of Novel Structures in Dense Deuterium and Deuterium Saturated Palladium at Nuclear Reactions Induced by γ -Quanta

Elemental composition studies of Pd sample irradiated by γ -quanta in dense deuterium gas of continuous spectrum with the boundary 8.8 MeV energy were carried out. Significant anomalies in the structure and chemical composition are obtained. Considerable changes are observed at both ends of the Pd rod as blowouts of molten metal with complex element composition. A short description of the phenomenological model of nuclear reactions leading to the observed anomalies is presented.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Более полувека проводятся исследования процессов, происходящих в дейтериевой, тритиевой и ^3He -плазме с целью создания энергетического термоядерного реактора (ИТЭР) [1–3]. Несмотря на достигнутый прогресс, проблемы создания ИТЭР по-прежнему остаются нерешенными, хотя все процессы, происходящие в ИТЭР, достаточно хорошо изучены [1, 2].

В данной работе предлагается альтернативный подход, основанный на использовании фоторасщепления дейтронов в плотном газе дейтерия и в насыщенном дейтерием палладии под действием γ -квантов с необходимыми энергиями. В каждом акте фоторасщепления дейтронов образуются нейтрон и протон с энергиями, определяемыми кинематикой реакции и соответствующими законами сохранения энергии-импульса.

Целью данного исследования является изучение процессов в плотном газе дейтерия и насыщенном дейтерием палладии под действием γ -квантов с энергиями ниже, чем характерные энергии гигантского дипольного резонанса (т. е. $E\gamma < 10$ МэВ) [4], а также исследование процессов формирования новых объектов с различным химическим составом в протекающих ядерных и химических реакциях синтеза.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Для исследований были разработаны специализированные камеры высокого давления дейтерия (СКВДД), которые были изготовлены в нескольких модификациях. Принципиальная схема СКВДД представлена на рис. 1. Внутри СКВДД с внутренним диаметром 0,4 см был помещен образец — Pd (99,997 %) стержень (диаметр 0,38 см и длина 0,5 см). Pd-стержень был отделен разделительной фольгой из манганина ($\text{Cu}_{84}\text{Mn}_{14}\text{Ni}_2$) длиной 0,6 см, который располагался между Pd-стержнем и латунной подложкой длиной 0,5 см и диаметром 0,5 см для сбора синтезированных в результате ядерных и химических реакций в СКВДД объектов. Эта фольга отделяла Pd-стержень от латунного сборника и одновременно ограничивала поток частиц или атомных кластеров, которые должны были вылетать из Pd-стержня при его сильном

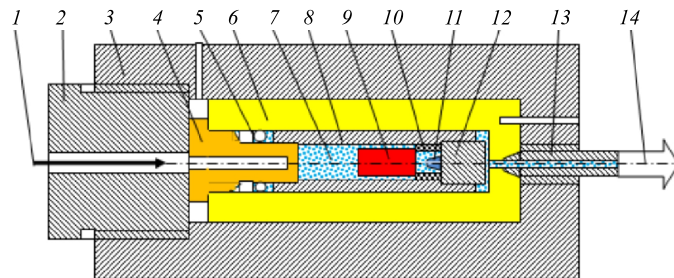


Рис. 1. Схематическое изображение СКВДД. 1 — поток ионизирующих частиц (γ -квантов); 2 — уплотнение с входным отверстием; 3 — уплотнение для высокого давления в камере; 4 — $\text{Cu}_{0,98}\text{V}_{0,02}$ «входное окно»; 5 — уплотнение для высокого давления; 6 — $\text{Cu}_{0,98}\text{V}_{0,02}$ стенки камеры высокого давления; 7 — дейтерий; 8 — латунная втулка; 9 — Pd-стержень; 10 — разделительная фольга из марганца; 11 — синтезированный продукт реакции; 12 — латунный сборник; 13 — капилляр высокого давления; 14 — клапан и тензор-датчик давления

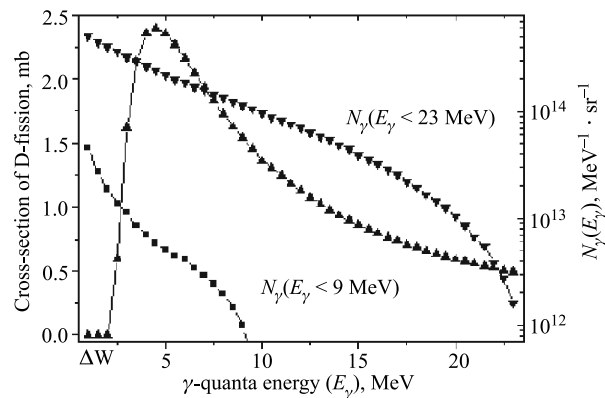


Рис. 2. Сечение фоторасщепления дейтрона $\sigma(d(\gamma, n)p)$, мб) и спектры γ -квантов $N_\gamma(E_\gamma)$ при двух пороговых энергиях: $E_\gamma < 9$ МэВ и $E_\gamma < 23$ МэВ на 1 мкА тока электронов

разогреве. Внутренний объем СКВДД составлял $V_D = 0,264 \text{ см}^3$ и был заполнен молекулярным дейтерием при давлении около 3 кбар. При этом давлении плотность молекулярного дейтерия составляла $n_D = 2,593 \cdot 10^{22} \text{ mol. D}_2/\text{cm}^3$ (см. [5]). Таким образом, общее число атомов дейтерия, находившихся в СКВДД, было $N_D = 1,369 \cdot 10^{22}$ атомов дейтерия. Эксперимент по изучению облучения γ -квантами с непрерывным спектром с граничной энергией $E_\gamma < 8,8$ МэВ был проведен на электронном ускорителе с энергией электронов $E_e = 9,3$ МэВ.

На рис. 2 представлены сечение фоторасщепления дейтрона $d(\gamma, n)p$ [4, 6] и два спектра γ -квантов при $E_\gamma < 8,8$ МэВ и $E_\gamma < 23,0$ МэВ в зависимости от энергии при 1 мкА тока электронного пучка.

Спектры γ -квантов $N_\gamma(E_\gamma)$ были рассчитаны с использованием выражений, представленных в [7]. Для того чтобы оценить полный поток γ -квантов на входе во внутренний объем СКВДД, заполненный дейтерием и Рд-стержнем, введем коэффициент β , который позволяет осуществить пересчет энергетического спектра γ -квантов от единиц измерения в $\text{МэВ}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ в плотность потока γ -квантов на единицу площади в см^2 . При расчете коэффициент β выбирался для максимально возможных потерь γ -квантов исходя из экспериментальных данных и имел значение $\beta \approx 0,026$. Вычислим теперь поток нейтронов и протонов в интервале их энергий до максимальной $0,5 \cdot [E_\gamma^{\text{max}} - \Delta W]$ с шагом $\Delta E_\gamma = 1,0$ МэВ от γ -квантов в реакции фоторасщепления $d(\gamma, n)p$ при двух граничных энергиях 8,8 МэВ и 23,0 МэВ с помощью выражения

$$Y(E_\gamma^{\text{max}}) = \beta \cdot N_D \int_{\Delta W}^{E_\gamma^{\text{max}}} \sigma_{d(\gamma, n)p}(E_\gamma) N_\gamma(E_\gamma) dE_\gamma, \quad (1)$$

где $\Delta W = 2,22$ МэВ — энергия связи дейтрона. На рис. 3 показаны гistogramмы числа нейтронов и протонов с шагом по 1,0 МэВ в двух диапазонах энергий 8,8 МэВ и 23 МэВ γ -квантов при токе электронов 1 мкА. Полное число нейтронов и протонов также показано на рис. 3.

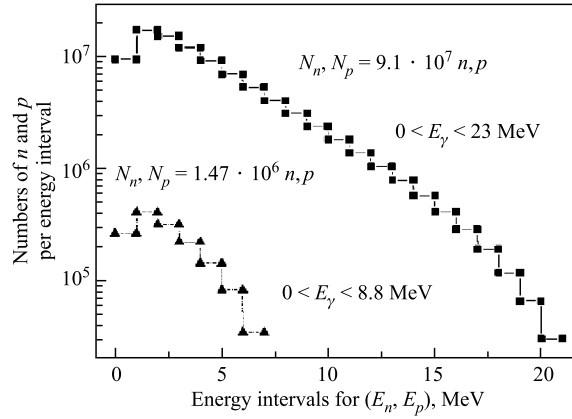


Рис. 4. Гistogramмы числа нейтронов и протонов для двух пороговых энергий γ -квантов $E_\gamma^{\text{max}} = 8,8$ МэВ и $E_\gamma^{\text{max}} = 23,0$ МэВ из $d(\gamma, n)p$ реакции соответственно

Полное время облучения в эксперименте с СКВДД при воздействии γ -квантов составило $T = 2,22 \cdot 10^4$ с (примерно 6 ч) при среднем токе пучка электронов на тормозной W-мишени около 7 мкА. Общее количество нейтронов и протонов от γ -квантов в эксперименте $N_{n,p} = 3,23 \cdot 10^{10} n, p$. Следует также отметить, что во время облучения γ -квантами СКВДД охлаждалась потоком сжатого воздуха при температуре примерно 20 °С, тем не менее, температура внешней поверхности СКВДД превышала 100 °С.

Перед вскрытием СКВДД давление внутри было измерено и оказалось равным примерно 3 кбар. Ввиду значительной наведенной активности СКВДД камеры после облучения ее вскрытие было проведено примерно через шесть месяцев после окончания облучения. При вскрытии камеры Рд-стержень с внешним диаметром 3,8 мм был заклинен из-за увеличения его диаметра до внутреннего размера латунной втулки с диаметром в 4 мм (рис. 1, поз. 8). Через два дня палладиевый стержень уменьшился в размерах, по-видимому, из-за десорбции дейтерия и самопроизвольно выпал. На латунном сборнике (см. рис. 1, поз. 11 и 12), как и ожидалось, что собственно понятно и из принципиальной схемы камеры СКВДД, был обнаружен синтезированный новый объект (СНО), по форме напоминающий выпуклую структуру в виде вулкана с кратером в центре. СНО имел выраженный голубой цвет и обладал диэлектрическими свойствами (см. рис. 4, а и б), что потребовало при его дальнейшем исследовании методами СЭМ напыления слоем золота с толщиной покрытия примерно в 1000 Å.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВСЕХ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРЫ СКВДД МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ (СЭМ) И МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА (МА)

Важно отметить, что МА-анализ и СЭМ-исследования структуры всех поверхностей проводились в трех независимых научных центрах с использованием различных электронных сканирующих микроскопов с рентгеновским зондовым анализом, а также методами рентгеноструктурного анализа. Это было сделано с тем, чтобы однозначно доказать, что химический элементный состав на всех поверхностях СКВДД после облучения γ -квантами был значительно изменен. Как видно из рис. 4, а (фотография в оптическом диапазоне) и 4, б (электронно-микроскопическое изображение), СНО имеет очень своеобразный вид с гладкими ровными стенками особенно в центральной области в виде «кратера». На верхней части СНО видны области в виде застывших капель, на дне «вулканического кратера» наблюдаются различные структуры, а на латунной подложке имеются подтеки в виде расплавленной массы также голубого цвета. Внешний вид латунной подложки при осмотре кажется не измененным, чего нельзя сказать о ее химическом составе.

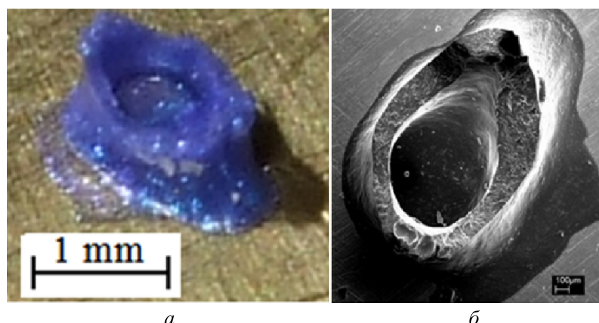


Рис. 5. Оптическая фотография (а) и электронно-микроскопическое изображение СНО (б)

Микроэлементный анализ выявил следующий химический состав (ат. %) на верхнем краю стенки «кратера» СНО (рис. 1, поз. 11): С — 40,24, О — 42,87, Na — 0,65, Mg — 1,40, Al — 3,49, Si — 3,71, К — 0,75, Ti — 5,26, Cu — 0,44, Zn — 0,26, Au — 0,94. Следует особенно отметить, что в измеренной области на верхней части «кратера» наблюдалось значительное количество таких элементов, как Ti (13,07% вес. %), Al (4,88 вес. %), Si (5,41 вес. %), Mg (1,77 вес. %), и очень небольшое количество основных элементов Cu (1,44 вес. %) и Zn (0,87 вес. %), которые должны составлять основу латунного сборника.

Концентрации химических элементов (ат. %), полученные микроэлементным анализом с поверхности латунного сборника вокруг СНО (рис. 1, поз. 12), следующие: С — 39,70, О — 0,86, Fe — 0,25, Cu — 29,29, Zn — 18,40, Nb — 1,49, а концентрации химических элементов (ат. %), полученные из микроэлементного анализа с поверхности в месте растекшейся «лавы» от стенок СНО (рис. 4, а), имеют следующий вид: С — 55,01, О — 35,08, Mg — 1,48, Al — 0,92, Si — 2,26, К — 0,35, Ti — 2,47, Cu — 0,85, Zn — 0,49, Au — 1,10.

Тем самым все элементы, которые присутствуют на плоской вершине «вулкана с кратером» в центре объекта, присутствуют и на расплавленном участке или так называемой «лаве», хотя и при несколько измененных значениях: Ti — 4,44 вес. %, Al — 1,04 вес. %, Si — 2,65 вес. %, Mg — 1,77 вес. % и с более высокими концентрациями меди и цинка, которые составляют основу латунного сборника, т.е. Cu — 2,26 вес. %, Zn — 1,32 вес. %. Это можно объяснить тем, что растекшийся слой тонкий, и электронный пучок частично достигает латунной подложки в процессе анализа.

Представляется очень важным отметить, что концентрация кислорода в СНО очень высока — 42,87 ат. % (в стенках кратера) и 35,08 ат. % (в растекшейся «лаве»), в то время как на поверхности латунного сборника кон-

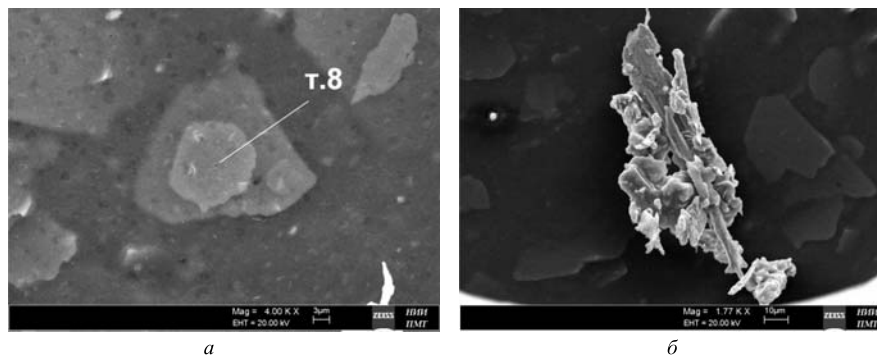


Рис. 6. Различные структуры на «дне кратера». *а* — пластинчатые, *б* — рекристаллизованные из расплава, а также близкие к сферическим в виде капель из палладия

центрация кислорода составляет только 0,86 ат.%. Следует заметить, что по результатам рентгеноструктурного анализа титан присутствует в СНО в форме рутила, то есть диоксида титана (TiO_2), в который, по-видимому, и связался образовавшийся в результате ядерных реакций кислород.

На рис. 5 приведены два типа структур, обнаруженные на дне кратера: *а* — пластинчатые и *б* — кристаллизованные. Яркие точки — это сферические структуры, состоящие преимущественно из палладия. Интересен химический состав этих различных объектов на дне «кратера», таких как кристаллизовавшаяся структура, а также множественные плоские тонкие пластины различных форм, покрывающие «дно кратера», и мелкие оплавленные кусочки частиц, состоящие преимущественно из Pd. Следует отметить, что все эти объекты слабо связаны с дном кратера, поскольку перемешаются под электронным пучком за счет нагрева.

Элементный состав (ат.%) плоских пластин, расположенных на «дне кратера», следующий: С — 19,57, О — 20,29, К — 3,98, Ti — 50,65 ат.% и 66,42 — Ti вес.%, Fe — 0,77, Cu — 2,11, Zn — 1,42, Au — 1,22. Нужно отметить, что дно самого «кратера» того же химического состава, что и эти пластинчатые объекты. Как видно, пластинчатые объекты включают в себя большое количество Ti до $(66,42 \pm 0,97)$ вес.%. Причем, как показал рентгеноструктурный анализ, титан содержится в виде рутила (TiO_2). Следует также отметить, что наряду с преобладающим содержанием титана в пластинчатых структурах присутствуют и близкие по порядковому номеру (заряду ядер) элементы, такие как К — $(4,26 \pm 0,16)$ вес.% и Fe — $(1,17 \pm 0,07)$ вес.%, а также небольшие количества Cu — $(3,68 \pm 0,12)$ вес.% и Zn — $(2,54 \pm 0,10)$ вес.%. Как видно, концентрации меди и цинка в пластинчатых объектах примерно одинаковы с их концентрациями в верхней части «кратера» СНО, а также в расплаве на поверхности латунного сборника.

Элементный состав (ат. %) на анализируемой поверхности другого кристаллизовавшегося объекта на дне кратера (рис. 5, б) следующий: С — 20,87, О — 8,80, Al — 3,31, Ti — 2,76, Fe — 1,35, Cu — 35,56, Zn — 21,36, Au — 2,85.

С использованием другого микроскопа с МА повторно и более подробно был изучен элементный состав латунной подложки по ее диаметру с одной и с другой сторон от СНО и непосредственно с верха и самого СНО (рис. 1, поз. 12). Элементный состав (вес. %) на вершине СНО в четырех измеренных точках имеет следующий состав:

т. 1: С — 26,81, О — 37,78, Mg — 0,44, Al — 5,27, Si — 6,88, К — 1,7, Са — 0,31, Ti — 13,17, Fe — 0,31, Cu — 1,17, Zn — 0,67, Au — 5,49;

т. 2: С — 50,5, О — 38,43, Mg — 1,62, Si — 2,92, Ti — 0,32, Zn — 0,81, Au — 5,39;

т. 3: С — 38,51, О — 26,35, Mg — 0,74, Al — 4,81, Si — 7,36, Cl — 0,27, К — 1,76, Ti — 9,73, Cu — 0,7 %, Zn — 0,83, Au — 8,93;

т. 4: С — 56,69, О — 30,39, Mg — 1,7, Al — 0,89, Si — 4,03, К — 0,28, Ti — 2,54, Zn — 0,67, Au — 2,81.

Как видно, в двух измеренных точках наблюдается высокая концентрации Ti (13,17 вес. % и 9,73 вес. %), которая сопровождается наличием химических элементов, таких как Al (5,27 и 4,81 вес. %), Si (6,88 и 7,36 вес. %) и К (1,7 и 1,76 вес. %), а также таких элементов, как Fe, Са, Cl и Mg.

Элементный состав поверхности латунного сборника измерялся с одной стороны от застывшей «лавы из кратера» вблизи СНО в шести точках и с другой стороны — в четырех точках. Элементный состав (вес. %) представлен в шести точках с одной стороны СНО:

т. 1: С — 40,21, О — 25,79, Mg — 1,58, Al — 0,33, Si — 3,46, К — 0,87, Са — 0,26, Ti — 12,88, Fe — 0,46, Cu — 3,6, Zn — 2,49, Pd — 0,99, Au — 7,07, отношение концентраций Cu/Zn = 1,45;

т. 2: С — 28,73, О — 2,47, Cl — 0,12, Fe — 0,19, Cu — 38,84, Zn — 25,45, Au — 4,21, отношение концентраций Cu/Zn = 1,53;

т. 3: С — 31,79, О — 1,12, Fe — 0,25, Cu — 41,59, Zn — 24,76, Au — 0,48, отношение концентраций Cu/Zn = 1,68;

т. 4: С — 49,81, О — 7,43, Na — 0,73, Al — 0,37, Si — 0,0, Cl—0,45, Са — 0,17, Ti — 0,28, Fe — 0,86, Cu — 21,45, Zn — 12,98, Au — 5,47, отношение концентраций Cu/Zn = 1,65;

т. 5: С — 33,16, О — 2,12, Al — 0,17, Si — 0,13, Са — 0,26, Fe — 0,2, Cu — 39,97, Zn — 23,29, Au — 0,7, отношение концентраций Cu/Zn = 1,72;

т. 6: С — 39,78, О — 6,16, Al — 1,06, Si — 0,86, Ca — 0,26, Ti — 0,12, Fe — 0,15, Cu — 29,74, Zn — 17,39, Au — 4,72, отношение концентраций $Cu/Zn = 1,71$.

Как видно, наблюдается почти систематическое увеличение отношения концентраций меди и цинка по мере приближения к краю латунного сборника. Это напрямую свидетельствует о том, что поверхность латунного сборника покрыта и сам СНО образован продуктами ядерных реакций из перегретого палладиевого стержня, который помимо выбросов атомов и кластеров атомов, видимо, выбрасывал и куски палладия и титана тоже (см. рис. 5). Как и в предыдущих измерениях, на поверхности латуни концентрация кислорода весьма мала, но по-прежнему велика в расплаве вблизи и в самого СНО.

Остановимся на исследованиях поверхности и элементного состава образца палладия. СЭМ-изображения исходной (а) и сильно измененной поверхности (б) облученного Pd-стержня с края, ближайшего к СНО, представлены на рис. 6.

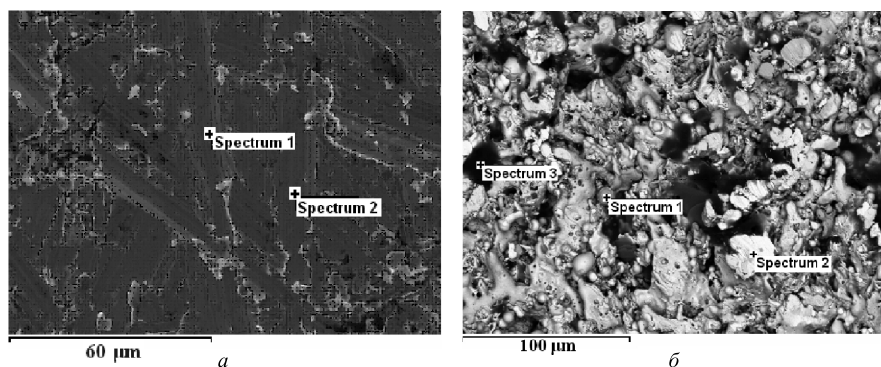


Рис. 7. СЭМ-изображения исходной (а) и облученной (б) поверхности Pd-стержня

Элементный состав (вес. %) края Pd-стержня (рис. 1, поз. 9) в семи измеренных точках выглядит следующим образом:

т. 1: О — 3,05, Cu — 49,25, Zn — 37,99, Pd — 1,51, отношение концентраций $Cu/Zn = 1,23$;

т. 2: Cu — 12,55, Zn — 5,92, Pd — 74,26, отношение концентраций $Cu/Zn = 2,12$;

т. 3: О — 14,64, Si — 0,65, S — 1,08, Ca — 0,71, Ti — 1,38, Cu — 8,29, Zn — 3,81, Pd — 25,66, отношение концентраций $Cu/Zn = 2,18$;

т. 4: Cu — 6,45, Zn — 3,02, Pd — 88,18, отношение концентраций $Cu/Zn = 2,14$;

т. 5: Cu — 3,88, Zn — 2,55, Pd — 93,58, отношение концентраций $Cu/Zn = 1,52$;

т. 6: O — 22,76, Al — 3,37, Si — 3,4, K — 0,54, Ti — 11,61, Cu — 31,20, Zn — 10,41, Pd — 10,71, отношение концентраций $Cu/Zn = 3,0$;

т. 7: O — 2,89, Mg — 0,38, Cu — 28,73, Zn — 7,59, Pd — 52,49, отношение концентраций $Cu/Zn = 3,79$.

Часть Pd-стержня, близкая к СНО, превратилась в неоднородный, состоящий из отдельных кластеров с различным составом химических элементов, с толщиной 82 мкм и диаметром в 3,8 мм. Именно поэтому невозможно было вынуть Pd-стержень при открывании СКВДД, поскольку, по-видимому, один край стержня значительно увеличился в объеме. При образовании такой неоднородной структуры на торце палладия при процессах деления палладия образовывались такие химические элементы, как медь и цинк с концентрациями в отдельных местах до 31,20 вес. % и 10,41 вес. % (т. 6), 49,25 вес. % и 37,99 вес. % (т. 1). В то же время концентрация Ti достигает 1,38 вес. % (т. 3) и в некоторых местах оказалась до 11,61 вес. % (т. 6), а для сопутствующих химических элементов концентрации достигают: Si — 0,65 вес. %, S — 1,08 вес. %, Ca — 0,71 вес. % (т. 3), для других обнаруженных химических элементов: Al — 3,37 вес. %, Si — 3,4 вес. %, K — 0,54 вес. % (т. 6).

Необходимо отметить, что при высочайшем разогреве поверхности палладия, которое происходило флуктуационно в отдельных местах, где вспыхивали реакции синтеза легких ядер и деления ядер палладия, также имели место мощные процессы испарения как отдельных атомов, так и кластеров атомов, состоящих преимущественно из более легких атомов, которые и выбрасывались наряду с кусками более крупными (типа кусков палладия и переплавленных кусков сплава из меди и цинка, достигших дна «кратера» СНО, см. рис. 5). Именно об это и свидетельствует столь значительное отличие отношения Cu/Zn , доходящее от примерно 2 до в отдельных точках примерно 4. При этом выбросы атомов и кластеров атомов и целых кусков осуществлялись и в сторону торца на «входном окне» в СКВДД (см. рис. 1, поз. 4).

Элементный состав (вес. %) торца стержня, ближнего к входному окну (рис. 1, поз. 4), в трех измеренных точках выглядит следующим образом:

т. 1: C — 5,78, Pd — 94,22;

т. 2: C — 4,19, O — 3,0, Pd — 92,81,

т. 3: O — 5,84, V — 1,93, Cr — 4,88, Fe — 72,44, W — 14,92.

Рентгеновские линии кислорода и углерода близки к линиям палладия, поэтому можно считать, что в т. 1 и т. 2 элементный состав соответствует исходному особо чистому палладию.

Элементный состав (вес. %) исходного палладия (т. 1 и т. 2) и облученной боковой поверхности (т. 3 и т. 4) следующий:

т. 1: Pd — 100;

т. 2: O — 5,81, Pd — 95,19;

т. 3: O — 11,14, Al — 0,33, Si — 0,72, S — 1,03, K — 0,58, Ca — 1,00, Fe — 4,07, Ga (Pt) — 22,85, Ru — 8,84, Pd — 31,18, La — 18,27;

т. 4: O — 16,68, Na — 0,57, Al — 0,9, Si — 1,61, P — 0,37, S — 1,08, Cl — 1,66, K — 1,53, Ca — 1,13, Pd — 74,47.

Как видно, произошли значительные изменения и на втором торце, а также на боковой поверхности Pd-стержня. Боковая поверхность облученного Pd-стержня претерпела кардинальные изменения, образец приобрел более темный по сравнению с исходным образцом цвет, боковая поверхность стала более неоднородной, с множеством трещин и темных контрастов, если сравнивать с участками с высокой концентрацией палладия. Именно в одной из таких трещин и были обнаружены V, Cr, Fe на торцевом конце Pd-стержня с противоположного края, а K, Ca, Fe, Ru, Rh с Pt до нескольких вес. % в трещинах на боковой стороне Pd-стержня.

Как будет показано ниже, образование примесей свидетельствует о протекании в палладиевом стержне, насыщенном дейтерием, ядерных реакций деления тяжелых ядер Pd на два более легких осколка, например таких, как Ti и Cr и сопутствующие им элементы в распадных цепочках, такие как K, Ca, Fe.

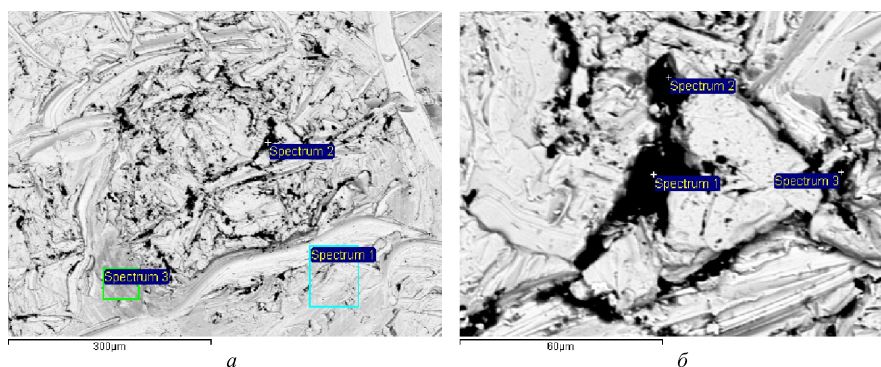


Рис. 8. СЭМ-микрофотографии центральной части входного окна из бериллиевой бронзы: *a* — с меньшим и *б* — с большим увеличением ($\times 5$)

Приведем также элементный состав и СЭМ-микрофотографии. (рис. 7) поверхности входного окна из бериллиевой бронзы (рис. 1, поз. 4).

Химический состав (вес. %) входного окна из бериллиевой бронзы представлен для трех измеренных участков поверхности, для каждого из них в двух точках от центра к краю:

т. 1,1: С — 7,5, О — 5,18, Cu — 87,32;

т. 1,2: С — 13,63, О — 16,95, Al — 0,37, Cu — 69,05;

т. 2,1: С — 20,33, О — 42,94, Al — 30,92, Ca — 0,29, Ti — 0,36, Cu — 4,54;

т. 2,2: С — 13,96, О — 41,44, Al — 41,49, Ti — 0,55, Cu — 4,5, Ag — 0,62;

т. 3,1: С — 6,87, О — 22,18, Al — 0,75, Cl — 0,49, Cu — 69,7;

т. 3,2: С — 6,17, О — 2,72, Al — 0,43, Cu — 88,55, Ag — 2,14.

На основании проведенных экспериментальных измерений поверхности всех элементов, стоящих в камере СКВДД, можно сделать основной, экспериментально обоснованный и однозначно доказанный вывод о протекании ядерных реакций деления ядер Pd внутри СКВДД при облучении γ -квантами.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Рассмотрим все возможные ядерные реакции для описания наблюдаемых явлений. Следующие процессы происходят при облучении плотного дейтерия (3 кбар) и насыщенного дейтерием палладиевого стержня внутри камеры СКВДД при воздействии потока непрерывного спектра γ -квантов с пороговой энергией $E_\gamma = 8,789$ МэВ.

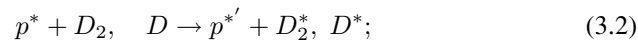
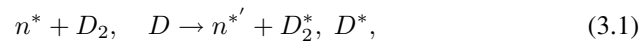
1. Диссоциации молекулярного дейтерия на атомы дейтерия:



такая диссоциация должна увеличивать давление внутри СКВДД.

2. Фоторасщепление дейтрона — реакция $d(\gamma, n)p$. При этом энергия нуклонов должна удовлетворять выражению $E_n \approx E_p = 0,5[E_\gamma - \Delta W]$.

3. Упругое рассеяние фотопротонов (p^*) и фотонейтронов (n^*) высокой энергии на атомах дейтерия в плотном газе дейтерия или связанных атомах дейтерия в палладию:



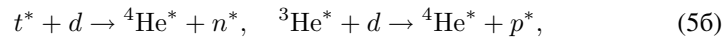
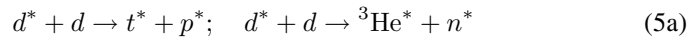
символ «*» здесь и далее означает «горячий» дейтрон или другая частица, которые могут упруго или неупруго взаимодействовать с другими дейтронами и атомами дейтерия, нагревая их и участвуя в реакциях горячего синтеза.

Следует отметить, что имеются различия при упругом рассеянии заряженных частиц в зависимости от структуры твердого тела, то есть аморфных и кристаллических конденсированных сред [8]. Хаотическое расположение атомов не создает периодический потенциал в решетке, тем самым исключая процессы малых потерь энергии, как при движении частиц в режиме каналирования. Различие заключается в том, что для кристаллических и аморфных тел изменяется сечение рассеяния σ . Для аморфных мишеней следует использовать газовое сечение, равное $\sigma_{\text{amorph}} = \pi d^2 \approx 0,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^7 \text{ б}$. Для кристаллических мишеней это значение необходимо умножить на фактор $\alpha = \Theta/MS^2$, где Θ , M и S — температура решетки (в нашем случае возможная температура достигает $\approx 2000 \text{ }^\circ\text{C}$), масса атома решетки и скорость звука соответственно [8]. Скорость звука порядка $3 \cdot 10^3 \text{ м/с}$. Следовательно, фактор α порядка $\alpha = 0,017$ для мишени из Pd, поэтому для различного состояния мишени этот фактор может варьироваться в диапазоне $0,017 < \alpha < 1,0$. Таким образом, сечение рассеяния для монокристалла палладия можно оценить как $\sigma_{\text{cryst}} = \alpha \cdot \pi \cdot d^2 \approx 8,5 \cdot 10^5 \text{ б}$, но все равно это значение велико.

Сечения упругого рассеяния нейтронов можно выбрать геометрическими $\sigma_n \approx \pi \cdot [R_n^2 + R_d^2]$, т. е. десятки мб, в то время как сечения рассеяния протонов на дейтронах должны быть близкими к атомным газодинамическим сечениям. Как известно, быстрые нейтроны с энергиями $E_n > 0,1 \text{ МэВ}$ при упругом рассеянии на дейтронах замедляются. Критерием эффективности замедления нейтронов является среднее число нейтронных столкновений с ядрами замедлителя $\bar{n} = \ln[E_n^0/E]/\xi$ при замедлении от исходной энергии E_n^0 до E (см. [9], с. 62), где ξ — средняя логарифмическая потеря энергии нейтронов на одно столкновение, равная 0,725 для дейтерия. Число столкновений при замедлении от максимальной энергии нейтрона 3,3 МэВ до тепловой энергии 0,025 эВ составляет 26. Таким образом, средняя энергия, передаваемая дейтрону, должна быть $\overline{\Delta E_d} \approx 130 \text{ кэВ}$. Максимальная энергия, передаваемая протонами атомам дейтерия и молекулам дейтерия, составляет

$$E_D^{\text{max}} = \frac{8}{9} E_{n,p}; \quad E_{D_2}^{\text{max}} = \frac{16}{25} E_{n,p}. \quad (4)$$

4. Термоядерный синтез «горячих» дейтронов и образовавшихся продуктов реакций в плотном газе дейтерия и насыщенном дейтерием палладии осуществляется в результате реакций:



однако процессы происходят с уменьшением числа участвующих частиц и уменьшением сечений по мере снижения энергии частиц. Сечения $D-D$ - и $D-T$ -реакции приведены в [10–12].

5. Реакции (γ, n) и (γ, p) на ядрах, если энергия γ -кванта превышает $|Q|$ реакции, т.е. $E_\gamma > |Q|$, есть реакции вида ${}^A_Z N(\gamma, n) {}^{A-1}_Z N$ и ${}^A_Z N(\gamma, p) {}^A_{Z-1} N$ с рождением фотонейтронов и фотопротонов.

6. Захват тепловых нейтронов атомными ядрами ${}^A_Z N(n, \gamma) {}^{A+1}_Z N$.

7. Деление ядер средних масс, индуцированных нейтронами, протонами и дейтронами высоких энергий из реакций (3)–(5): ${}^A_Z N(n, {}^{A_1}_{Z_1} N) {}^{A-A_1+1}_{Z-Z_1} N$; ${}^A_Z N(p, {}^{A_1}_{Z_1} N) {}^{A-A_1+1}_{Z-Z_1+1} N$; ${}^A_Z N(d, {}^{A_1}_{Z_1} N) {}^{A-A_1+2}_{Z-Z_1+1} N$. Отметим, что деление ядер возможно для достаточно тяжелых ядер, если параметр деления $Z^2/A > 17$ ([см. 13], с. 437). А это условие выполняется как раз начиная с ядер палладия, т.е. для них $Z^2/A[{}^{110}_{46}\text{Pd}] = 19,2$, см. также работы [14–16], в которых обсуждается зависимость барьера деления ядер средних масс в капельной модели ядра в зависимости от орбитальных чисел.

8. Наиболее эффективный нагрев холодных атомов дейтерия в насыщенном дейтерием палладии и плотном газообразном дейтерии происходит за счет упругого кулоновского рассеяния продуктов деления ядер, таких как Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Cu и Zn, которые обнаружены в СКВДД в значительных макроскопических количествах с энергиями в несколько МэВ, т.е. с использованием упругого рассеяния в реакциях ${}^A_Z N^* + D \rightarrow {}^A_Z N^* + D^*$ и ${}^A_Z N^* + D_2 \rightarrow {}^A_Z N^* + D_2^*$.

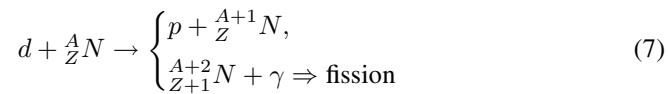
9. Для того чтобы оценить сечения реакций, следуя работе [6], введем длину волны для протонов с энергией E_p , равную $\lambda = 4,553 \cdot 10^{-3} / E_p^{1/2}$ [МэВ], и эффективное сечение реакции $\sigma_{\text{эфф}} = 0,6512 / E_p$ [МэВ] б.

10. Сечение подбарьерного слияния при нерезонансных экзотермических реакциях между легкими заряженными частицами и ядрами, а также и для $d-d$ - и $d-t$ -реакций имеет вид

$$\sigma(E) = \frac{C}{\sqrt{E}} \left\{ \sqrt{\frac{E_G}{E}} \times \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right) \right\} = \frac{S}{E} \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right); \quad (6)$$

здесь $E_G = \frac{M}{2}(2\pi \cdot e_0^2 \cdot Z_1 Z_2 / \hbar)^2$ — энергия Гамова, а C и S — параметры, слабо зависящие от энергии E . Очевидно, что множитель в фигурных скобках (6) описывает вероятность прохождения заряженных частиц через кулоновский барьер и называется проникаемостью барьера. Множитель $C/E^{1/2}$ может быть представлен в первом приближении как произведение геометрического сечения столкновений, пропорционального πR^2 , на вероятность ядерной реакции, где сталкивающиеся частицы находятся в пределах действия ядерных сил, т.е. на расстояниях $r < R$. Эта вероятность пропорциональна времени нахождения частицы в области $r < R$, т.е. значению $R/V \sim 1/E^{1/2}$.

Приведенные выше реакции, которые происходят в СКВДД при облучении γ -квантами, могут адекватно описать обнаруженный химический состав за счет цепных реакций нагрева холодных атомов дейтерия преимущественно упругим рассеянием протонов с большими газовыми сечениями и частично нейтронами из реакции (3) и последующими реакциями синтеза легких ядер и деления ядер палладия, осколки деления которых значительно разогревают атомы и молекулы дейтерия в насыщенном дейтерием палладии и газообразном дейтерии. Преимущественную роль в процессах деления ядер палладия играют, по-видимому, горячие ядра — дейтроны, которые могут с учетом реакции Оппенгеймера [17]:



как вновь создавать «горячие» протоны, так и делить ядра палладия (см. [13–16]).

Ядерные реакции, в результате которых образуются обнаруженные химические элементы, достаточно подробно представлены в работах [11, 12], поэтому в данной работе на них останавливаться не будем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно представить следующий сценарий развития процесса: γ -кванты играют роль инициаторов процессов слияния-деления, а именно: 1) создают атомарный дейтерий с увеличением давления внутри ДНРС; 2) вызывают фоторасщепление дейтронов на протоны и нейтроны высоких энергий; 3) эти фотопротоны и фотонейтроны, упруго рассеиваясь, передают свою кинетическую энергию «холодным» атомам дейтерия, нагревая их и создавая «горячие» дейтроны; 4) «горячие» атомы дейтерия — дейтроны могут взаимодействовать с «холодным» атомами дейтерия в термоядерных процессах слияния с образованием легких продуктов деления, таких как протоны, нейтроны, тритоны и ядра ${}^3\text{He}$; 5) такие «горячие» легкие ядра, в свою очередь, могут нагревать атомы дейтерия и взаимодействуют друг с другом в процессах термоядерного синтеза; 6) нагретые ядра дейтерия по реакции Оппенгеймера [17] могут вновь создавать «горячие» протоны и вызывать деление ядер палладия на более легкие ядра, которые и были обнаружены в результате микроэлементного анализа; 7) эти ядра, в свою очередь, нагревают вновь атомы дейтерия, и процесс развивается по нарастающей, но с выходом части продуктов из реакции, в связи с чем требуется своеобразная «подпитка» реакций потоком внешних γ -квантов.

Разработанный подход может быть использован в качестве фундаментальной основы для нового типа дейтерированных ядерных реакторов деления

(ДЯРД) с высокой эффективностью. Дейтерированный Pd-металл одновременно играет роль замедлителя и поглотителя нейтронов. Такие ДЯРД могут быть компактными и недорогими и могут заменить ядерные реакторы на основе обогащенного урана. Обогащенный уран сам по себе может служить в качестве «топлива» в реакторе дейтерия деления, так как уран поглощает до трех атомов дейтерия на один атом урана — UD_3 (см. [9, 11, 12]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин М. Л., Курбатов Д. К., Филимонова Е. А. // Вопросы атомной науки и техники. 2010. № 3. С. 55.
2. Chen F. F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 1. Springer Science–Business Media LLC, 2006. P. 425.
3. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. М.: Физматлит, 2007. 424 с.
4. Ишханов Б. А., Капитонов И. М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во МГУ, 1979. 215 с.
5. Didyk A. Yu., Wiśniewski R., Altynov V. A. JINR Commun. E17-2008-183. Dubna, 2008.
6. Бете Г., Мориссон Ф. Элементарная теория ядра. М.: ИЛ, 1958. 356 с.
7. Тараско М. З., Солдатов А. С., Рудников В. Е. // АЭ. 1988 Т. 65, № 4. С. 290.
8. Yavlinskii Yu. Track Formation in Amorphous Metals under Swift Heavy Ion Bombardment // NIM B. 2009. V. 146. P. 142–146.
9. Гидриды металлов / Под ред.: В. Мюллера, Д. Блэкледжа и Дж. Любовица. М.: Атомиздат, 1973. 429 с.
10. Raiola F., Burhard B., Fullöp Z. et. al. // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 27, s01 P. 79.
11. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. JINR Preprint E15-2012-34. Dubna, 2012.
12. Didyk A. Yu., Wiśniewski R. JINR Preprint E15-2012-35. Dubna, 2012.
13. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра, М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
14. Sierk A. J. Mass-Asymmetric Fission of Light Nuclei // Phys. Rev. 1985. V. 55, No. 6. P. 582–583.
15. Sierk A. J. Macroscopic Model of Rotating Nuclei // Phys. Rev. 1986. V. 55, No. 6. P. 2039–2052.
16. Moretto L. G. // Nucl. Phys. A. 1975. V. 247. P. 211.
17. Oppenheimer J. R., Phillips M. Note for the Transmission Functions for Deuteron // Phys. Rev. 1935. V. 48, No. 15. P. 500–502.

Получено 3 мая 2012 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 27.06.2012.

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

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,34. Тираж 225 экз. Заказ № 57690.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/