

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

*А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев, А. С. Русецкий**

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

Представлены результаты исследований низкоэнергетических ядерных реакций на установке ГЕЛИС (ФИАН). Результаты по исследованию выходов DD-реакций в дейтерированных кристаллических структурах при значениях энергии дейтронов 10–25 кэВ показали значительный эффект усиления. Воздействие пучков ионов H^+ (протонов) и Ne^+ в диапазоне значений энергии 10–25 кэВ и пучка рентгеновского излучения 20–30 кэВ на дейтерированные мишени приводит к стимулированию выходов DD-реакции. Для мишени из CVD-алмаза показано, что ориентация образца по отношению к пучку дейтронов оказывает влияние на величину выхода нейтронов. При воздействии пучков ионов D^+ на мишень TiD_x выделение тепла намного превосходит тепловыделение с пучками H^+ и Ne^+ и зависит от концентрации дейтерия в мишени и плотности тока пучка дейтронов.

The results of studies of low-energy nuclear reactions on the installation GELIS (LPI) are presented. Results on research of DD-reactions in deuterated crystal structures at deuteron energies 10–25 keV showed significant enhancement effect. The effect of the beams of ions Ne^+ and H^+ at energies in the range of 10–25 keV and a beam of X-radiation of 20–30 keV for deuterated target leads to stimulation of DD-reaction. For the target of CVD-diamond it is shown that the orientation of the sample with respect to the deuteron beam affects the neutron yield. When the target TiD_x is exposed to beams of D^+ ions, heat generation is far superior to heat production with beams of H^+ and Ne^+ , depending on the concentration of deuterium in the target and beam current density of deuteron.

PACS: 25.70.Jj; 29.40.Wk; 29.30.Kv

Измерение сечений ядерных реакций синтеза при низких энергиях представляет значительный интерес как для создания энергетических установок нового поколения, так и для понимания процессов, протекающих внутри звезд. Эксперимент Р. Девиса [1], в котором обнаружено расхождение между экспериментально измеренным потоком нейтрино от Солнца и теоретическим

*E-mail: rusets@lebedev.ru

расчетом, стимулировал создание ускорительных установок для прямого измерения сечения ядерных реакций при низких энергиях. Для объяснения дефицита солнечных нейтрино было предложено провести эксперименты по поиску резонанса в реакции ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$ [2–4]. С этой целью были созданы высокоточные ускорители ГЕЛИС [5] и LUNA-1 [6]. Серия работ коллаборации LUNA показала значительные эффекты усиления выхода реакции ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ при энергиях в области гамовского пика [7, 8]. Авторы связали это с эффектом экранирования ионов электронами плазмы, который приводит к облегчению преодоления кулоновского барьера при синтезе ядер и увеличивает выход реакции.

В работе [9] были показаны эффекты усиления DD-реакции на мишенях Al, Zr, Ta. Коллаборация LUNA проделала серию работ по исследованию выходов DD-реакции в различных материалах [10, 11]. Показано, что эффекты усиления напрямую зависят от элементного состава мишени. Немного ранее в Японии в ядерном центре Сендай были проведены работы по исследованию усиления выходов DD-реакции при энергиях меньше 10 кэВ [12, 13]. Максимальные эффекты усиления получены на мишенях Pd и PdO/Pd/PdO/Au. В серии работ, проделанных сотрудниками ОИЯИ и ТПУ на импульсном ускорителе Холла, изучены выходы DD- и Dp-реакций в CD₂, D₂O и в кристаллических структурах — ZrD₂, TiD₂, TaD_{0,5} и др. [14–17]. Показано значительное усиление выходов ядерных реакций в твердотельных структурах, которое авторы пытались объяснить как эффектами экранирования, так и каналированием дейтронов.

В настоящей работе приводятся результаты исследований низкоэнергетических ядерных реакций на установке ГЕЛИС.

Установка ГЕЛИС [18], созданная в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, позволяет получать непрерывные пучки ионов с током до 50 мА и энергиями до 50 кэВ и предназначена для проведения широкого спектра экспериментов, таких как изучение столкновений легких ядер с энергией в десятки кэВ, изучение элементарных и коллективных процессов в ионно-пучковой плазме, изучение взаимодействий ионного пучка с различными материалами, модификация их поверхности и получение методом ионно-лучевого распыления тонкопленочных покрытий. Основной частью установки ГЕЛИС является ускоритель ионов, который включает в себя: 1) ионный источник (дуоплазмотрон) с оборудованием, обеспечивающим его питание; 2) систему фокусировки ионного пучка; 3) вакуумную систему; 4) диагностическую аппаратуру для измерения тока и энергии ионного пучка.

В последние годы на ГЕЛИС проведена серия работ по исследованию выходов DD-реакций в дейтерированных кристаллических структурах при энергиях дейтронов 10–25 кэВ, а также по стимулированию DD-реакции пучками ионов [18–23]. В качестве мишеней использовались дейтерированные структуры палладия [18, 20], титана [19, 21], CVD-алмаза [23]. Для детектирования

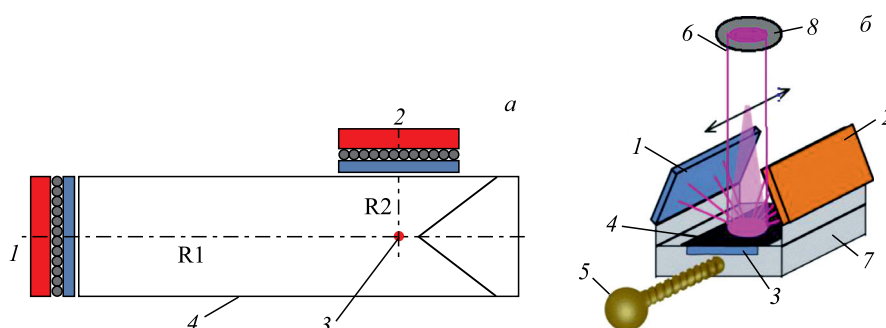
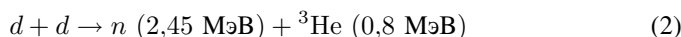


Рис. 1. *а*) Схема расположения ^3He -детектора на установке ГЕЛИС: 1, 2 — два положения ^3He -детектора ($R1 = 120$ см, $R2 = 30$ см); 3 — место расположения мишени; 4 — контуры установки ГЕЛИС. *б*) Схема расположения мишени и трековых детекторов в пучке ионов в установке ГЕЛИС: 1–3 — трековые детекторы CR-39 с различными покрытиями; 4 — мишень; 5 — манипулятор; 6 — пучок ионов; 7 — стальная подложка; 8 — диафрагма

продуктов DD-реакций



использовались многоканальный детектор нейтронов на основе счетчиков с наполнением ^3He и трековый детектор CR-39. Схемы расположения детекторов и мишени на установке ГЕЛИС показаны на рис. 1. Процедура калибровки детекторов описана в [18].

Для вычисления выхода DD-реакции из толстой мишени (катода), бомбардируемой дейтронами с энергией E_d , мы использовали формулу [18]

$$Y_b(E_d) = \int_0^{E_d} N_D(x) \sigma_{\text{lab}}(E) \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE, \quad (3)$$

где $N_D(x)$, $\sigma_{\text{lab}}(E)$ и dE/dx — плотность дейтронов в катодe, сечение DD-реакции и тормозная способность дейтронов в материале мишени соответственно. С учетом того, что в процессе облучения и повышения температуры мишени начальная концентрация дейтерия в ней может измениться, для расчетов используется эффективная концентрация дейтерия. Она определяется как $N_{D(\text{eff})} = k(W, T)N_D(x)$, где T и W — температура и мощность на поверхности мишени. При этом коэффициент k может быть записан как

$$k(W, T) = \exp \left[-\frac{\varepsilon_d \Delta T}{k_B T_m T_0} \left(\frac{W_m}{W_x} \right) \right], \quad (4)$$

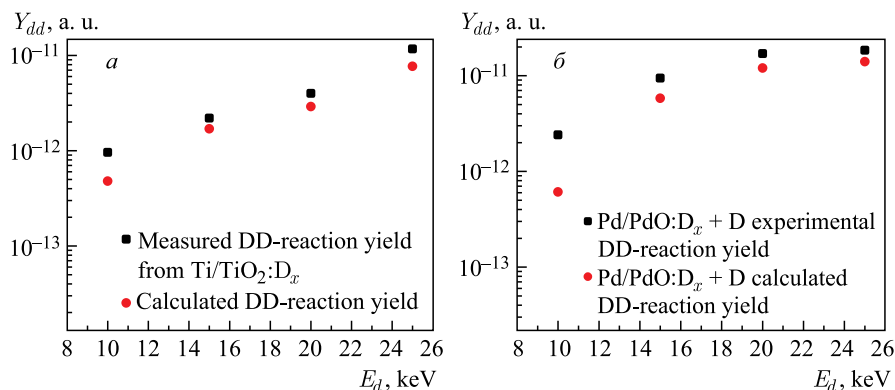


Рис. 2. Зависимость выходов DD-реакции из мишени Ti/TiO₂:D_x (а) и Pd/PdO:D_x (б) от энергии пучка D⁺. ■ — измеренный выход DD-реакции по пучку; ● — выход DD-реакции, рассчитанный для данных значений энергии

где ε_d — энергия активации выхода дейтрона с поверхности мишени; T_m — максимальная температура на поверхности мишени; $T_0 = 290$ К — начальная температура мишени, $\Delta T = T_m - T_0$; W_m — максимальная мощность при $E_d = 25$ кэВ, $I_m = 0,2$ мА; W_x — значение мощности при других (меньших) значениях тока и напряжения.

Зависимость выхода DD-реакции из мишеней Pd/PdO:D_x и Ti/TiO₂:D_x от энергии дейтронов приведена на рис. 2. Там же приведены значения выходов DD-реакции, рассчитанные по формуле (3) для данных условий эксперимента. Из рис. 2 видно, что экспериментальные выходы DD-реакции из мишеней значительно превосходят расчетные значения. Так, при $E_d = 10$ кэВ для мишеней Ti/TiO₂:D_x и Pd/PdO:D_x экспериментальные выходы больше расчетных в 2 и 4 раза соответственно.

При этом коэффициент усиления определяется как

$$f(E) = \frac{Y_{\text{exp}}(E)}{Y_b(E)} = \exp\left[\frac{\pi\eta(E)U_e}{E}\right], \quad (5)$$

где $Y_{\text{exp}}(E)$ — экспериментальный выход DD-реакции; $Y_b(E)$ — выход при той же энергии, определенный в соответствии с экстраполяцией Боша–Халле [24]; $2\pi\eta = 31,29Z^2(\mu/E)^{1/2}$ — параметр Зоммерфельда (здесь Z — заряд дейтрона, μ и E — приведенная масса и энергия дейтрона соответственно).

Расчетные значения потенциала экранирования U_e составили для Pd/PdO:D_x $U_e = 630$ – 980 эВ и для Ti/TiO₂:D_x $U_e = 160$ – 750 эВ. Расчет потенциалов экранирования был проведен для двух «крайних» условий: 1) при $T = 1887$ и 1941 К — температуре плавления палладия и титана

в области пучка и 2) при $T = 350$ К — температуре, зарегистрированной термпарным термометром на краю мишени.

Также исследовалась возможность стимулирования выходов DD-реакций из гетероструктур Pd/PdO:D_x и Ti/TiO₂:D_x пучками ионов H⁺ и Ne⁺ в диапазоне значений энергии 10–25 кэВ. Схема эксперимента аналогична схеме с пучком ионов D⁺ (см. рис. 1). Исследовался выход протонов и нейтронов продуктов DD-реакций (1) и (2) при воздействии пучка ионов на предварительно дейтерированную мишень. На рис. 3 показаны результаты измерения потока нейтронов детектором ³He при воздействии пучков H⁺ и Ne⁺ на мишень Ti/TiO:D_x. Фоновые измерения проводились с аналогичными пучками на мишени Cu. Из рис. 3 видно, что при воздействии пучка на мишень Ti/TiO:D_x наблюдается превышение показаний нейтронного детектора над фоновыми значениями. Трековые детекторы CR-39 также показали наличие эмиссии протонов от дейтерированных мишеней, облученных пучком ионов (рис. 4). Положение крайнего левого пика на рис. 4 показывает наличие треков от протонов с начальной энергией 3 МэВ (продуктов DD-реакции). Аналогичные результаты были получены с мишенью Pd/PdO:D_x. Средний поток DD-нейтронов, стимулированный пучком, достигал величины $\sim 10^2$ с⁻¹ в 4π ср.

В экспериментах на ГЕЛИС с пучком ионов D⁺ ($E \leq 25$ кэВ) при регистрации нейтронов из дейтерированной мишени детекторами на основе ³He-счетчиков была обнаружена анизотропия в выходе нейтронов из реакции (1), поток нейтронов вдоль направления пучка ионов оказался выше потока нейтронов, исходящих из мишени в направлении поперек пучка. Наиболее ярко анизотропия в выходе продуктов ядерной реакции (1) в кристаллической структуре проявилась, когда в качестве кристаллической мишени использовалась мишень из поликристаллического CVD-алмаза [25]. Перед облучением образец CVD-алмаза насыщался дейтерием путем электролиза [23]. Изображения ростовой поверхности CVD-алмаза в оптическом микроскопе,

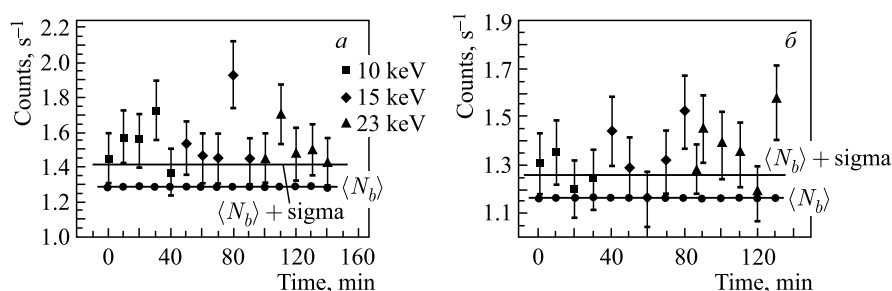


Рис. 3. Счет нейтронного детектора ³He (■, ◆, ▲). а) Мишень Ti/TiO:D_x 300 мкм, пучок — H⁺ (10, 15, 23 кэВ); б) мишень Ti/TiO:D_x 30 мкм, пучок — Ne⁺ (10, 15, 20 кэВ). Средний фон $\langle N_b \rangle$ (●) измерен с мишенью Cu

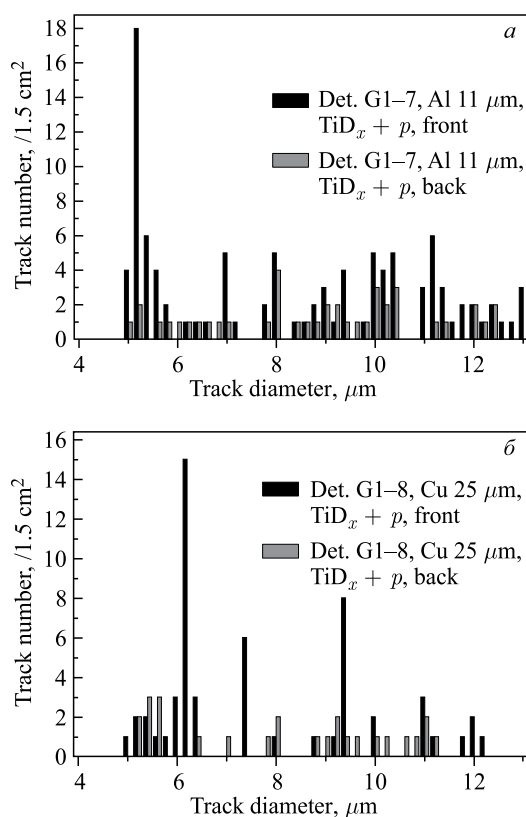


Рис. 4. Распределения диаметров треков на детекторах CR-39 с покрытием 11-мкм Al (а) и 25-мкм Cu (б), расположенных над образцом $\text{Ti/TiO}_2:\text{D}_x$, облученным пучком протонов с энергией 23 кэВ

а поверхности скола в электронном микроскопе (рис. 5) выявляют четкую текстуру кристаллитов, квадратные грани (100) ориентированы в плоскости пленки, их характерный латеральный размер составляет $d \approx 50$ нм.

Измерялись потоки нейтронов (продуктов DD-реакций), направленных по пучку и поперек пучка ионов дейтерия с помощью нейтронного детектора на основе ^3He -счетчиков. Относительный выход DD-реакции определялся по формуле $Y_{dd} = n_n / (SI_d)$, где n_n — поток нейтронов вдоль или поперек пучка; S — площадь мишени под пучком, I_d — ток пучка ионов дейтерия. На рис. 6, а показана зависимость выхода нейтронов из образца CVD-алмаза от угла β между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени. Видно, что наблюдается значительное уменьшение выхода нейтронов при повороте мишени относительно пучка дейтронов. При нормальном падении пучка дей-

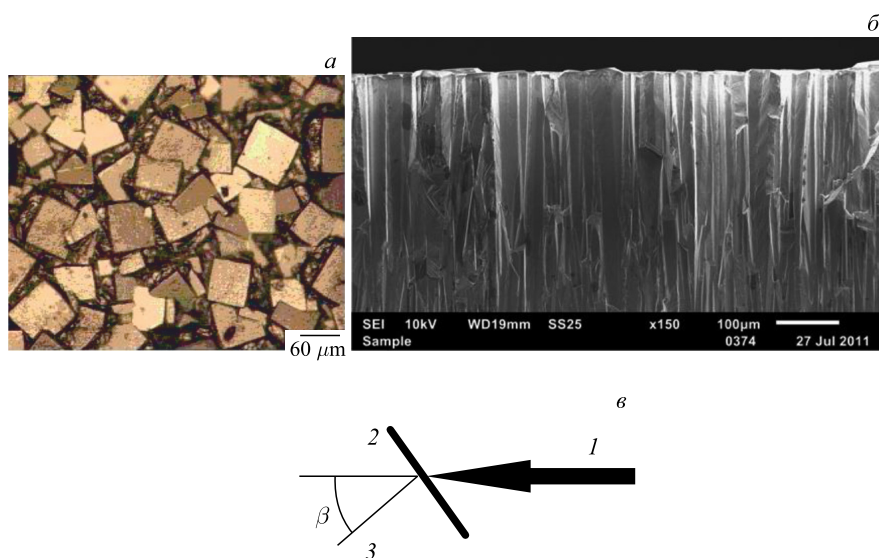


Рис. 5. Изображение ростовой поверхности в оптическом микроскопе (а) и поверхности скола в электронном микроскопе (б). в) Схема падения пучка на мишень: 1 — направление ионного пучка; 2 — мишень; 3 — нормаль к плоскости мишени

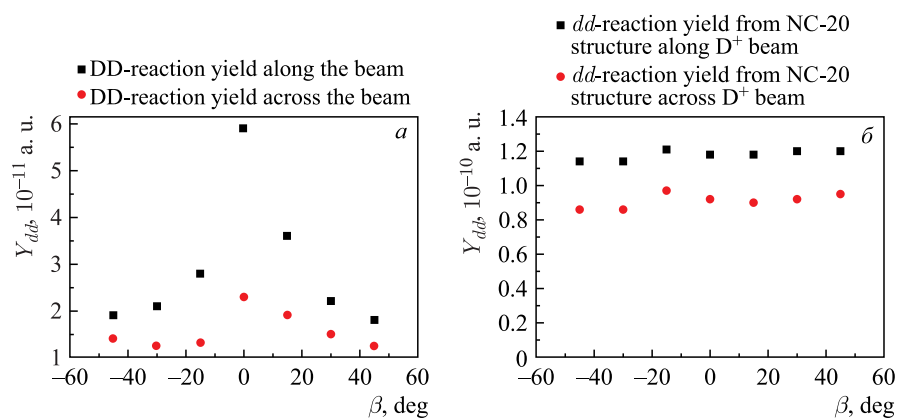


Рис. 6. Зависимость выхода нейтронов из образца CVD-алмаза (а) и нанокompозита NC-20 (80% — алмаз, 20% — графит) (б) от угла β между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени (■ — вдоль пучка, ● — поперек пучка)

тронов на мишень выход нейтронов примерно в три раза больше, чем при угле поворота мишени $\beta = \pm 45^\circ$. Сильная зависимость выхода нейтронов от угла β может свидетельствовать о наличии узких каналов в образце

CVD-алмаза, в которых сконцентрировано основное количество дейтерия, попавшего туда в процессе электролиза. Большой выход нейтронов при $\beta = 0^\circ$ может быть объяснен тем, что эффективный пробег ионов дейтерия в каналах значительно выше, чем в алмазе. Для сравнения была использована мишень из изотропного материала нанокompозита NC-20 (80 % — алмаз, 20 % — графит). Выход нейтронов из этого материала не зависит от ориентации мишени в пучке (рис. 6, б).

Таким образом, экспериментально было показано, что ориентация кристаллической структуры мишени из CVD-алмаза по отношению к пучку дейтронов оказывает влияние как на величину выхода нейтронов, так и на отношение величины выхода нейтронов вдоль и выхода поперек направления пучка. Зависимость выхода нейтронов от угла β может свидетельствовать о наличии узких каналов в образце CVD-алмаза, в которых сконцентрировано основное количество дейтерия, попавшего туда в процессе электролиза. Такими выделенными направлениями могут быть границы зерен (в нашем случае почти вертикальные вблизи ростовой стороны). Сильная анизотропия в выходе нейтронов может быть объяснена эффектом каналирования в ориентированных кристаллитах алмаза как ионов пучка, так и продуктов ядерной реакции — нейтронов. Это явление было предложено использовать в генераторах нейтронов для получения направленного потока монохроматических нейтронов [26].

Схема по стимулированию выходов DD-реакции в дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов показана на рис. 7, а. В качестве мишеней использовались дейтерированные структуры текстурированного CVD-алмаза, палладия и циркония. Использовалась острофокусная рентгеновская трубка моноблочной конструкции фирмы ООО «ИФО», снабженная поликапиллярной полулинзой. Диаметр фокального пятна на образце составлял примерно 2,5 мм. Энергия рентгеновских квантов была 20–30 кэВ, ток пучка — 20–100 мкА. Измерения нейтронной эмиссии проводились детектором на основе ^3He -счетчиков СНМ-18. Фоновые измерения проводились без дейтерированной мишени при включенной рентгеновской трубке, облучавшей медную подложку. Измерения суммарного счета нейтронных счетчиков при облучении рентгеновскими квантами мишени палладия, ранее облученной ионами дейтерия, приведены на рис. 7, б.

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 $\sim 10^2 \text{ с}^{-1}$ в 4π ср. Также в отдельные моменты времени превышает на 3σ средний фон, что указывает на наличие «нейтронных вспышек» ($\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$ в 4π ср), стимулированных рентгеновским излучением. Процент таких превышений 3σ фона для дейтерированных мишеней значительно больше значений для распределения Пуассона, описывающего распределе-

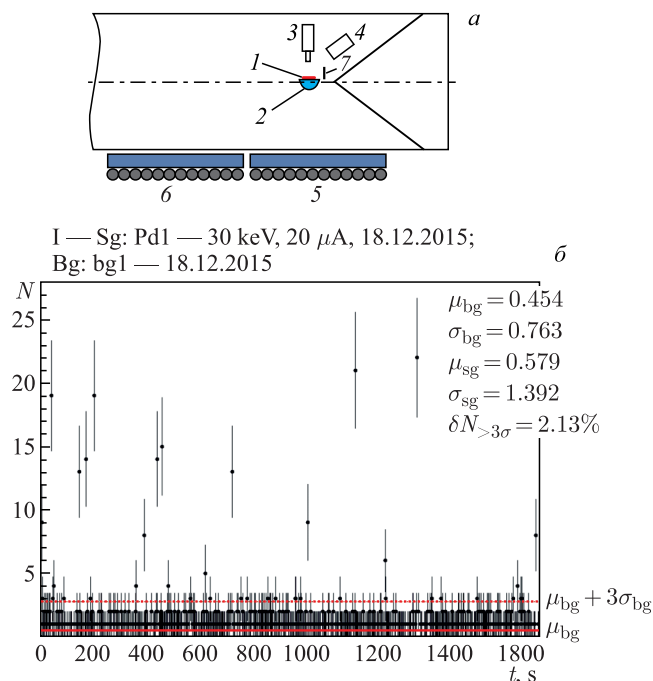


Рис. 7. а) Схема эксперимента по облучению мишеней рентгеновскими квантами: 1 — мишень; 2 — держатель мишени из меди; 3 — рентгеновская трубка с анодом из Cr; 4 — детектор рентгеновского излучения АМРТЕК; 5, 6 — нейтронные детекторы на основе ^3He -счетчиков; 7 — трековый детектор CR-39. б) Зависимость суммарного счета нейтронного детектора от времени при облучении рентгеновскими квантами мишени палладия, ранее облученной ионами дейтерия, в сравнении с фоном (мишень Cu)

ния отсчетов для фоновых значений. Наличие таких «нейтронных вспышек» ранее было показано при стимулировании DD-реакции в дейтерированных мишенях Pd/PdO:D_x механическими напряжениями [27, 28].

Для регистрации протонов (продуктов DD-реакции (2), стимулированной в дейтерированных мишенях пучком рентгеновских квантов) использовался трековый детектор CR-39, расположенный на расстоянии 2 см от мишени. Число треков в диапазоне 5–7 мкм, которые соответствуют протонам с энергией 3 МэВ, вылетевшим из мишени, в 4–5 раз превосходит фон детектора от мишени из Cu.

Также была исследована зависимость температуры поверхности мишеней TiD_x и Ti от входящей мощности при облучении мишени пучками ионов водорода, неона. Схема эксперимента приведена на рис. 8, а. Зависимость

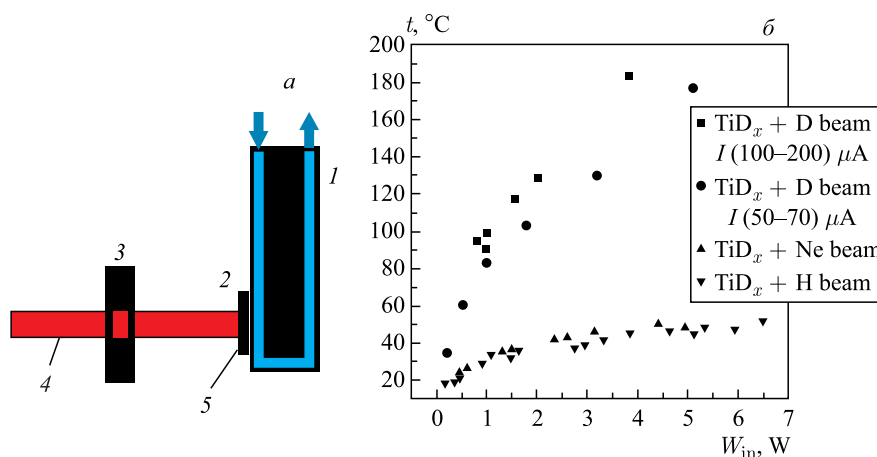


Рис. 8. а) Схема эксперимента по зависимости температуры мишеней TiD_x и Ti от входящей мощности: 1 — охлаждаемый водой держатель мишени; 2 — мишень; 3 — диафрагма; 4 — пучок; 5 — термопарный термометр. б) Зависимость температуры мишени TiD_x от входящей мощности при облучении мишени пучками ионов дейтерия (■ — ток 100–200 мкА; ● — ток 50–70 мкА), водорода (▼), неона (▲)

температуры мишени TiD_x от входящей мощности при облучении мишени пучками ионов дейтерия, водорода и неона показана на рис. 8, б. Показано, что при воздействии пучков ионов D^+ на мишень $Ti/TiO_2:D_x$ выделение тепла намного превосходит тепловыделение с пучками H^+ и Ne^+ и зависит от концентрации дейтерия в мишени и плотности тока пучка дейтронов [29]. При этом выход нейтронов DD -реакции не превышает величину 10^5 c^{-1} в 4π ср, что недостаточно для объяснения тепловыделения обычной DD -реакцией. Возможное объяснение избыточного тепловыделения заключается в том, что в твердотельной мишени DD -реакция, вероятно, идет по каналу $d + d \rightarrow {}^4He + Q$ (24 МэВ). Эта реакция, возможно, является основной, а реакции (1) и (2) при низких энергиях сильно подавлены. Эта гипотеза рассмотрена Э. Н. Цыгановым [30]. При энергии ниже 6 кэВ в с. ц. и. составное ядро ${}^4He^*$ уже не является изолированной системой, так как виртуальные фотоны от ${}^4He^*$ могут достигать ближайших электронов и уносить энергию возбуждения составного ядра.

В этом случае последовательный обмен виртуальными фотонами с электронами окружающей среды за время около 10^{-16} с приведет к потере составным ядром ~ 4 МэВ (после чего распады с вылетом нуклонов оказываются энергетически запрещенными), а затем и всей свободной энергии составного ядра (24 МэВ), и ядро 4He окажется в основном состоянии. Тогда основным процессом, обеспечивающим высвечивание энергии составного ядра ${}^4He^*$

до основного состояния ^4He , является обмен виртуальными фотонами между составным ядром и ближайшими электронами, включая электроны кристаллической решетки.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Г. А. Месяцу, В. И. Манько, С. С. Герштейну и Ю. И. Стожкову за полезные обсуждения проблем, затронутых в статье, а А. П. Чубенко, В. И. Цехошу, Б. Ф. Ляхову, Е. И. Саунину и В. Г. Ральченко — за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Davis R., Jr., Rogers L. C., Radeka V.* Report on the Brookhaven Solar Neutrino Experiment // *Bull. Am. Phys. Soc.* 1971. V. 16. P. 631.
2. *Fowler W. R.* What Cooks with Solar Neutrinos // *Nature.* 1972. V. 238. P. 24.
3. *Копысов Ю. С., Фетисов В. Н.* Не указывают ли эксперименты с солнечными нейтрино на существование резонанса в системе $^3\text{He} + ^3\text{He}$? // *Письма в ЖЭТФ.* 1972. Т. 16. С. 58.
4. *Fetisov V. N., Kopysov Yu. S.* Are the Solar-Neutrino Experiments Suggestive of the Existence of a Resonance in the $^3\text{He} + ^3\text{He}$ System? // *Phys. Lett. B.* 1972. V. 40. P. 602.
5. *Негодаев М. А., Багуля А. В.* Электрофизическая установка «Гелис». Препринт ФИАН. 1996. № 11.
6. *Greife U. et al.* Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics (LUNA) // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1994. V. 350. P. 327.
7. *Bonetti R. et al.* First Measurement of the $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$ Cross Section down to the Lower Edge of the Solar Gamow Peak // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 82. P. 5205.
8. *Junker M. et al.* Cross Section of $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$ Measured at Solar Energies // *Phys. Rev. C.* 1998. V. 57. P. 2700.
9. *Czerski K. et al.* Enhancement of the Electron Screening Effect for $d + d$ Fusion Reactions in Metallic Environments // *Europhys. Lett.* 2001. V. 54, No. 4. P. 449.
10. *Raiola F. et al.* Electron Screening in $d(d, t)p$ for Deuterated Metals and the Periodic Table // *Phys. Lett. B.* 2002. V. 547. P. 193.
11. *Raiola F. et al.* Enhanced Electron Screening in $d(d, t)p$ for Deuterated Metals // *Eur. Phys. J. A.* 2004. V. 19. P. 283.
12. *Kasagi J. et al.* Anomalous Enhancement of DD Reaction in Pd and Au/Pd/PdO Heterostructure Targets under Low-Energy Deuteron Bombardment // *JETP Lett.* 1998. V. 68. P. 785.
13. *Kasagi J. et al.* Strongly Enhanced DD Fusion Reaction in Metals Observed for keV D^+ Bombardment // *J. Phys. Soc. Japan.* 2002. V. 71, No. 12. P. 2881.
14. *Bystritsky V. M. et al.* Study of the $d(d, n)^3\text{He}$ Reaction in the Astrophysical Energy Region with the Use of the Hall Accelerator // *Eur. Phys. J. A.* 2008. V. 36. P. 151.

15. *Bystritsky V. M. et al.* Study of the $d(p, \gamma)^3\text{He}$ Reaction at Ultralow Energies Using a Zirconium Deuteride Target // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2014. V. 737. P. 248–252.
16. *Bystritsky V. M. et al.* Experimental Verification of Hypothesis of dd Reaction Enhancement by Channeling of Deuterons in Titanium Deuteride at Ultralow Energies // *Ibid.* V. 764. P. 42–47.
17. *Bystritsky V. M. et al.* First Experimental Evidence of $D(p, \gamma)^3\text{He}$ Reaction in Deuteride Titanium in Ultralow Collision Energy Region // *Ibid.* V. 753. P. 91–96.
18. Багуля А. В. и др. Исследование выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D_x при низких энергиях на установке ГЕЛИС // Крат. сообщ. по физике ФИАН. 2012. №9. С. 3.
19. Багуля А. В. и др. Исследование выходов DD-реакций из гетероструктуры Ti/TiO₂:D_x при низких энергиях на установке ГЕЛИС // Там же. №12. С. 3.
20. Багуля А. В. и др. Исследование стимулирования выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D_x пучками ионов H⁺ и Ne⁺ на установке ГЕЛИС // Крат. сообщ. по физике ФИАН. 2013. №10. С. 15.
21. Багуля А. В. и др. Стимулирование выходов DD-реакций из гетероструктуры Ti/TiO₂:D_x пучками ионов H⁺ и Ne⁺ на установке ГЕЛИС // Там же. №11. С. 3.
22. *Bagulya A. V. et al.* Study of DD-Reaction Yields from the Pd/PdO:D_x and the Ti/TiO₂:D_x Heterostructure at Low Energies Using the HELIS Setup // *Physica Scripta.* 2015. V. 90, No. 7. P. 074051.
23. *Bagulya A. V. et al.* Channeling Effect in Polycrystalline Deuterium-Saturated CVD Diamond Target Bombarded by Deuterium Ion Beam // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2015. V. 355. P. 340.
24. *Bosch H.-S., Hale G. M.* Improved Formulas for Fusion Cross-Sections and Thermal Reactivities // *Nucl. Fusion.* 1992. V. 32, No. 4. P. 611.
25. *Ralchenko V. G. et al.* Fracture Strength of Optical Quality and Black Polycrystalline CVD Diamonds // *Diam. Relat. Mater.* 2012. V. 23. P. 172.
26. Багуля А. В. и др. Генератор быстрых моноэнергетических нейтронов. Патент РФ №2568305 от 16.10.2015.
27. *Липсон А. Г. и др.* Комплексные измерения эмиссии нейтронов в процессе экзотермической десорбции дейтерия с поверхности гетероструктуры Au/PdO/Pd/PdO:D // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. 2003. №6. С. 49.
28. *Lipson A. G. et al.* Evidence for Low-Intensity D-D Reaction as a Result of Exothermic Deuterium Desorption from Au/Pd/PdO:D Heterostructure // *Fusion Technol.* 2000. V. 38, No. 2. P. 238.
29. *Dalkarov O. D., Negodaev M. A., Rusetskii A. S.* Investigation of Heat Release in the Targets during Irradiation by Ion Beams. Preprint FIAN. 2015. No. 8.
30. Цыганов Э. Н. DD-синтез в кристаллах // ЯФ. 2010. Т. 73, №12. С. 203.