

СТИМУЛИРОВАНИЕ ВЫХОДОВ DD-РЕАКЦИЙ ИЗ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Ti/TiO₂:D_x ПУЧКАМИ ИОНОВ H⁺ И Ne⁺ НА УСТАНОВКЕ ГЕЛИС

А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев, А. С. Русецкий,
А. П. Чубенко, А. Л. Щепетов

Приводятся результаты стимулирования выходов DD-реакций из гетероструктуры Ti/TiO₂:D_x пучками ионов H⁺ и Ne⁺ в диапазоне энергий 10–25 кэВ. Измерялись потоки нейтронов и протонов с помощью нейтронного детектора на основе He-3 счетчиков и пластикового трекового детектора CR-39. Измерения показали наличие значительных эффектов усиления выходов DD-реакций. Потенциал экранирования для данной гетероструктуры при данных условиях эксперимента оказался равен $U_e = 796$ эВ.

Ключевые слова: DD-реакция, выход нейтронов, ионные пучки.

В настоящей работе исследовалась возможность стимулирования выходов DD-реакций из гетероструктуры Ti/TiO₂:D_x пучками ионов H⁺ и Ne⁺ в диапазоне энергий 10–25 кэВ на установке ГЕЛИС. Данное исследование продолжает серию работ по стимулированию ядерных реакций в твердотельных гетероструктурах различными внешними излучениями [1].

Предшествующие исследования выходов DD-реакций из гетероструктур Pd/PdO:D_x и Ti/TiO₂:D_x при облучении дейтронами в диапазоне энергий дейтронов 10–25 кэВ на установке ГЕЛИС [2, 3] показали наличие значительных эффектов усиления экспериментальных выходов по сравнению с расчетными.

Измерялись потоки нейтронов и протонов (продуктов DD-реакций) с помощью нейтронного детектора на основе He-3 счетчиков и пластикового трекового детектора CR-39.

Параметры установки ГЕЛИС, процедура изготовления мишеней Ti/TiO₂:D_x, схема эксперимента, а также результаты калибровки детекторов подробно описаны в [2]. В

настоящем эксперименте вместо пучка дейтронов мы использовали пучки ионов H^+ и Ne^+ в диапазоне энергий 10–25 кэВ для воздействия на дейтерированную мишень $Ti/TiO_2:D_x$.

Облучение мишеней $Ti/TiO_2:D_x$ толщиной 300 и 30 мкм пучком протонов проводилось при энергиях 10 и 23 кэВ. Фоновые измерения проводились с мишенью $Ti/TiO_2:H_x$. Результаты экспериментов с измерениями трековым детектором CR-39 представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Мишень толщина, мкм	E_p , кэВ	I_p , мА	t_{exp} , ч	N_p , см ⁻²	n_p , с ⁻¹	N_{gr} , см ⁻²	n_n , с ⁻¹	Y_{dd}
$Ti/TiO_2:H_x$, 300	23	0.2	10	2	–	2	–	0
$Ti/TiO_2:D_x$, 300	23	0.2	10	23	$1.7 \cdot 10^{-2}$	42	12	$1.6 \cdot 10^{-15}$
$Ti/TiO_2:D_x$, 300	23	0.12	0.5	80	1.3	60	$2.5 \cdot 10^2$	$3.4 \cdot 10^{-14}$
$Ti/TiO_2:D_x$, 300	10	0.12	0.5	50	0.8	40	$1.6 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^{-14}$
$Ti/TiO_2:D_x$, 30	25	0.02	0.7	70	1.1	60	$2.5 \cdot 10^2$	$3.4 \cdot 10^{-14}$
$Ti/TiO_2:D_x$, 30	10	0.07	0.7	45	0.72	25	10^2	$1.4 \cdot 10^{-14}$

В таблице 1 E_p и I_p – энергия и ток пучка, N_p – средняя плотность треков протонов на 1 см² детектора, N_{gr} – средняя плотность треков протонов отдачи на задней стороне детектора, t_{exp} – время измерений, n_p – интенсивность эмиссии протонов, n_n – интенсивность эмиссии нейтронов, Y_{dd} – выход DD-реакции. Образцы $Ti/TiO_2:D_x$ в сериях с временами экспозиции 10 ч и 0.5(0.7) ч отличались временем насыщения дейтерием – 10 ч и 36 ч соответственно.

Фоновый образец $Ti/TiO_2:H_x$ не показал при облучении какой-либо протонной или нейтронной эмиссии.

При облучении мишени $Ti/TiO_2:D_x$ толщиной 300 мкм пучком протонов с энергией 23 кэВ и током 0.2 мА трековые детекторы, расположенные над образцом, показали эмиссию протонов с энергией 3 МэВ, испущенных из мишени против направления пучка на уровне $n_p = 1.7 \cdot 10^{-2}$ с⁻¹ (см. распределения на рис. 1). Детектор с покрытием 33 мкм Al, расположенный сзади образца, зарегистрировал эмиссию нейтронов с энергией 2.45 МэВ, испущенных из мишени в направлении пучка на уровне $n_n = 12$ с⁻¹ (см. распределения на рис. 2).

Разница в потоках протонов и нейтронов объясняется тем, что DD-реакции имели место в глубине мишени, и протоны с энергией 3 МэВ в основном были поглощены в

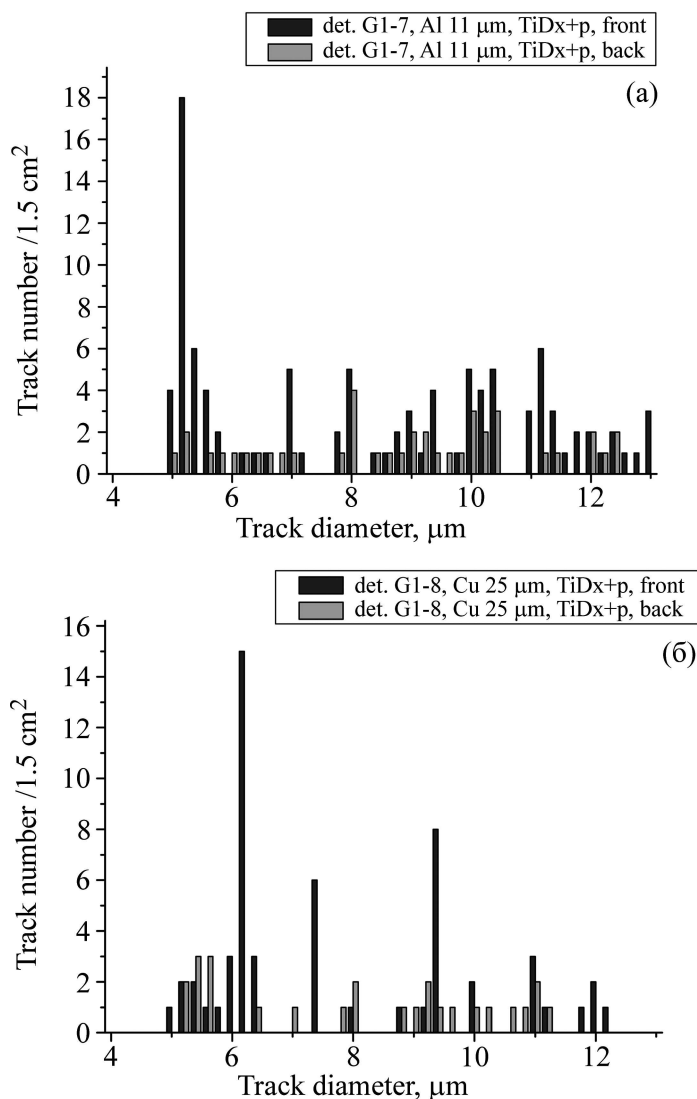


Рис. 1: Распределения диаметров треков на детекторах с покрытием 11 мкм Al (а) и 25 мкм Cu (б), расположенных над образцом $Ti/TiO_2:D_x$, облученным пучком протонов с энергией 23 кэВ.

ней. В то же время нейтроны беспрепятственно вылетали из мишени и были зарегистрированы трековым детектором.

Увеличение числа треков на обратной стороне детектора по сравнению с передней (см. рис. 3(а)) объясняется тем, что на передней стороне протоны отдачи образуются только в тонком стравленном слое детектора (9 мкм), а на обратной стороне детектируются протоны отдачи, образовавшиеся во всем детекторе. При этом полный

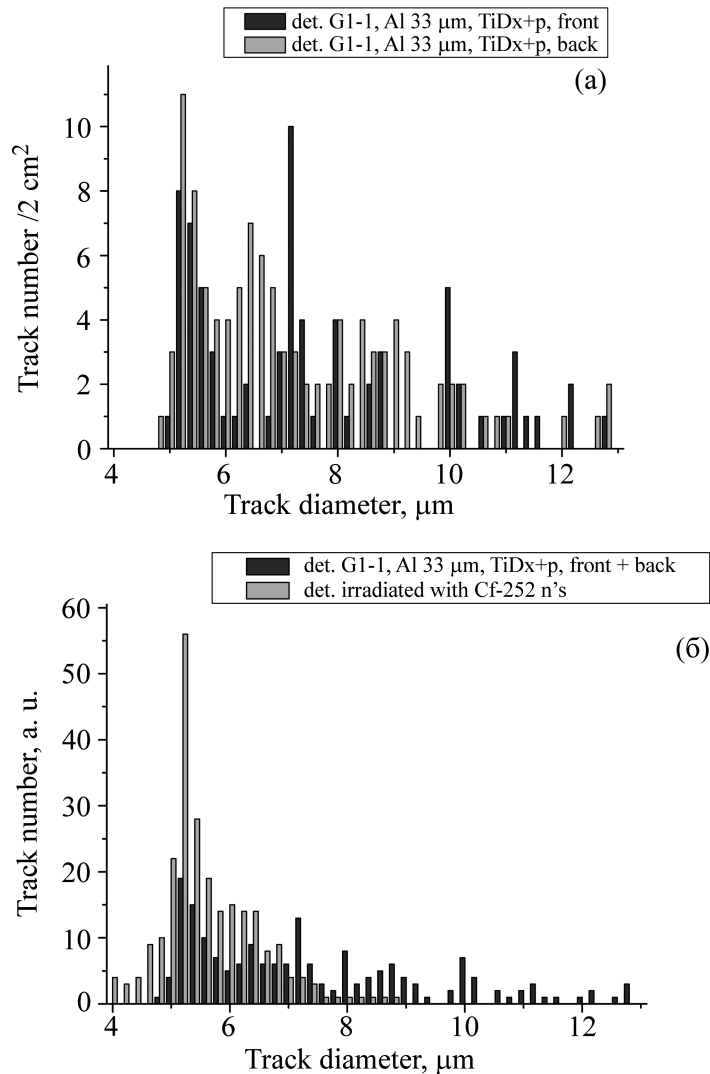


Рис. 2: (а) Распределения диаметров треков на передней (темные столбцы) и задней (светлые столбцы) сторонах детектора с покрытием 33 мкм Al, расположенного под образцом $Ti/TiO_2:D_x$, облученным пучком протонов с энергией 23 кэВ. (б) Суммарное распределение диаметров треков передней и задней сторон детектора (темные столбцы) в сравнении с детектором, облученным нейтронами от источника $Cf - 252$ (светлые столбцы).

флюенс нейтронов, испущенных вперед по пучку, за все время облучения (10 ч) составил $\Phi_n = 4.15 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Данные по детекторам, расположенным над образцом, дают $N_{gr} = 7.5 \text{ см}^{-2}$ – средняя плотность треков протонов отдачи на задней стороне детектора. Это соответствует потоку нейтронов, испущенных против пучка, $n_n = 2 \text{ с}^{-1}$. Это

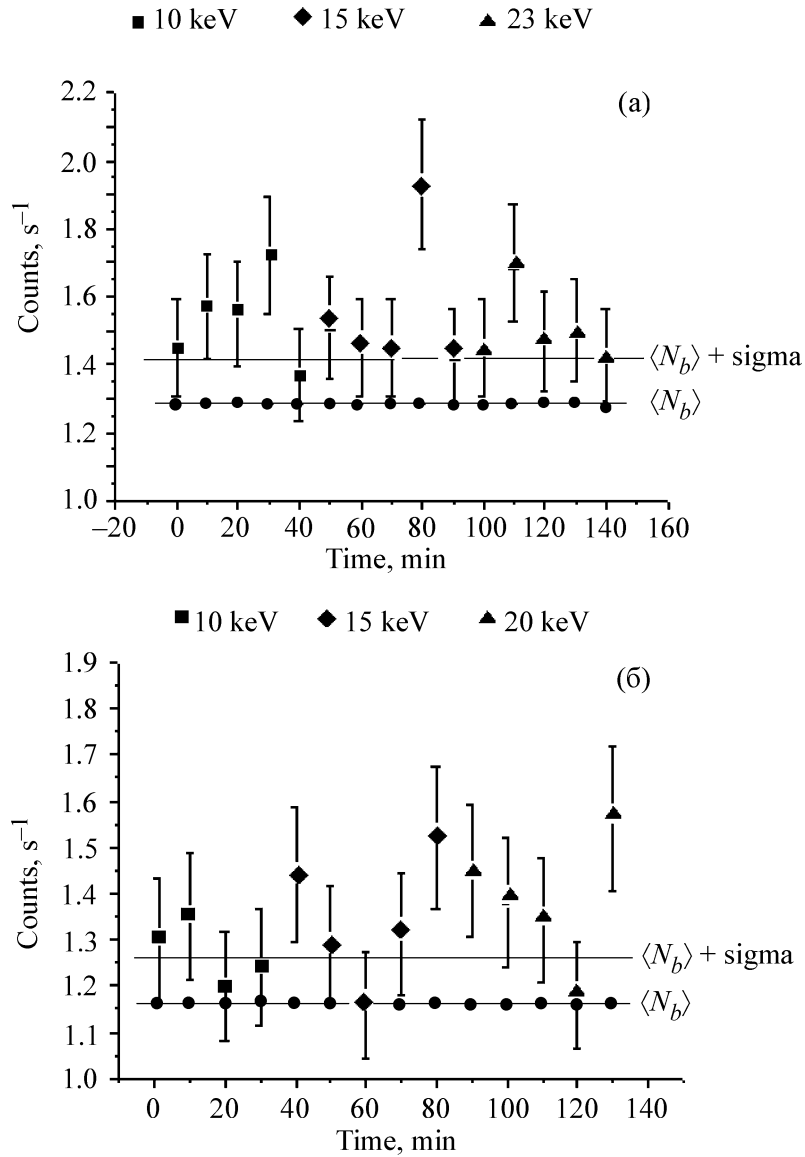


Рис. 3: Счет нейтронного детектора He-3 (■, ◆, ▲). (а) Мишень – Ti/TiO:D_x толщиной 300 мкм, пучок – H⁺ (10, 15, 23 кэВ), (б) Мишень – Ti/TiO:D_x, 30 мкм, пучок – Ne⁺ (10, 15, 20 кэВ). Средний фон $\langle N_b \rangle$ (●) измерен с мишенью Си.

примерно в 6 раз меньше потока нейтронов, испущенных вперед по пучку, что говорит о сильной анизотропии вылета продуктов DD-реакции.

На рис. 3 показаны результаты измерения потока нейтронов детектором He-3 при воздействии пучков H⁺ и Ne⁺ на мишень Ti/TiO:D_x. Фоновые измерения проводились с аналогичными пучками на мишени Си. Из рис. 3 видно, что при воздействии пучка

на мишень Ti/TiO:D_x наблюдается превышение показаний нейтронного детектора над фоновыми значениями.

Для расчета выхода DD-реакции из мишени Ti/TiO:D_x при облучении пучком ионов использовалась методика расчета, описанная в [2].

Чтобы оценить выходы DD-реакции из мишеней Ti/TiO₂:D_x при облучении пучком ионов мы использовали упрощенную модель процесса, принимая во внимание, что десорбция дейтерия, стимулированная излучением, приводит к току дейтронов,двигающихся к поверхности из образца. Такой ток дейтронов можно рассматривать как “пучок”, а дейтерированную поверхность как “мишень”.

Потенциал экранирования U_e оценивался по полуэмпирической формуле [4]:

$$U_e = (T/T_0)^{-1/2}[a \ln(y) + b], \quad (1)$$

где $a = 145.3$ и $b = 71.2$ – численные константы и $y = k \times y_0(J_d/J_0)$. Здесь $k = \exp(-\varepsilon_d \Delta T/k_B T T_0)$, $\varepsilon_d = 0.04$ эВ – энергия активации дейтрона, $y_0 = 10Me/D$ – отношение концентраций атомов металла и дейтерия в мишени при $T_0 = 290$ К и $J_0 = 0.03$ mA/cm², $J_d = 1$ mA/cm² – плотность тока дейтронов из мишени. Ток дейтронов определялся по разности масс образца до и после облучения, поскольку скорость десорбции дейтерия из образца и определяет эту величину.

Потенциал экранирования для мишени Ti/TiO:D_x, рассчитанный по формуле (1), оказался равен $U_e = 796$ эВ.

Таким образом, впервые показано, что воздействие пучков ионов H⁺ и Ne⁺ в диапазоне энергий 10–25 кэВ и токов 0.01–0.1 mA на дейтерированную гетероструктуру Ti/TiO:D_x приводит к заметному стимулированию выходов DD-реакции.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. П. Чернов, А. С. Русецкий, Д. Н. Краснов и др., ЖЭТФ **139**(6), 1088 (2011).
- [2] А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(9), 3 (2012).
- [3] А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(12), 3 (2012).
- [4] А. Г. Липсон, А. С. Русецкий, Б. Ф. Ляхов и др., Химия высоких энергий **42**(4), 361 (2008).

Поступила в редакцию 13 ноября 2012 г.

В исправленном варианте 12 августа 2013 г.