

ИЗУЧЕНИЕ СТИМУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ПЛАЗМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ РАЗРЯДОМ И ПУЧКАМИ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ НА УНИКАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ФИАН

А.В. Багуля, ст. научн. сотр. ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, канд. физ.-мат. наук

О.Д. Далькаров, нач. отд. ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, д-р физ.-мат. наук, dalkarov@sci.lebedev.ru

М.А. Негодаев, гл. научн. сотр. ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, д-р физ.-мат. наук

А.В. Огинов, вед. научн. сотр. ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, канд. физ.-мат. наук

А.С. Русецкий, вед. научн. сотр. ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, канд. физ.-мат. наук

Проведены исследования стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы с использованием уникальных установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р. Показана возможность стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком ионов, высоковольтным разрядом и пучком релятивистских электронов. Измерены выходы ядерных реакций в образцах CVD-алмаза и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия, а также в процессе высоковольтного разряда, и исследована зависимость от формы и материала электродов.

Ключевые слова: ядерные реакции, ионные пучки, взаимодействие излучения с веществом, ускоритель ионов, высоковольтный разряд, детекторы излучений, распознавание треков частиц.

STUDYING OF INCENTIVE NUCLEAR REACTIONS AND RADIATION ON BOUNDARY OF SOLID STATE AND PLASMA HIGH-VOLTAGE DISCHARGE AND ION AND ELECTRON BEAMS ON THE LPI UNIQUE INSTALLATIONS

A.V. Bagulya, Senior Researcher, Lebedev Physics Institute of RAS, Doctor of Physics and Mathematics

O.D. Dalkarov, Head of Department, Lebedev Physics Institute of RAS, Ph.D. of Physics and Mathematics, dalkarov@sci.lebedev.ru

M.A. Negodayev, Chief Researcher, Lebedev Physics Institute of RAS, Ph.D. of Physics and Mathematics

A.V. Oginov, Leading Researcher, Lebedev Physics Institute of RAS, Doctor of Physics and Mathematics

A.S. Rusetskiy, Leading Researcher, Lebedev Physics Institute of RAS, Doctor of Physics and Mathematics

Investigations of nuclear reactions and stimulating radiation on the boundary of a solid and plasma using the unique installations LPI GELIS, ERG and C-25R have been conducted. The possibility of stimulating nuclear reactions in deuterated target (Pd, Ti) ion beam, a high-voltage discharge and beam of relativistic electrons has been shown. The yields of nuclear reactions in samples of CVD-diamond and the carbon ion beam irradiation of deuterium, as well as in the high-voltage discharge, and the dependence on the shape and material of the electrodes have been measured.

Keywords: nuclear reactions, ion beams, the interaction of radiation with matter, ion accelerator, high-voltage discharge, radiation detectors, detection of particle tracks.

Введение

До настоящего времени выходы DD-реакции в металлических мишенях изучались, в основном, только с использованием ускорителей с $E_{lab} \geq 2,5$ кэВ [1–6]. Дальнейшее уменьшение ускоряющего напряжения приводит к серьезным проблемам, связанным с поддержанием тока, которые делает невозможным измерения продуктов DD-реакции за приемлемое время эксперимента из-за чрезвычайно малого выхода. В то же время, изучение поведения выхода/сечения DD-реакции при низких энергиях дейтронов (ниже 1 кэВ) представляет большой интерес в рамках изучения астрофизических процессов и эффектов экранирования в конденсированных средах, приводящих к возможному усилению ядерного взаимодействия изотопов водорода в металлах.

Эксперименты [7] показали, что импульсный тлеющий разряд способен генерировать ионы с энергиями 0,8–2,5 кэВ и плотностями тока 300–600 мА/см² при давлении дейтерия в диапазоне 2–10 мм Нг. Плотность тока, используемая при бомбардировке поверхности катода (мишени) в тлеющем разряде почти на 3 порядка величины выше, чем достигаемая с использованием ускорителей. Предварительные оценки показывают, что сильноточная бомбардировка дейтерием катода в тлеющем разряде позволит детектировать продукты DD-реакции даже при $E_d \leq 1$ кэВ за время экспозиции, не превышающее несколько десятков часов (в предположении экспоненциального роста коэффициента усиления DD-реакции при низких энергиях). При этом достигается значительное усиление выхода DD-реакции по сравнению с относительно слаботочными ускорителями заряженных частиц. Анализ данных показал, что при $E_d = 1.0$ кэВ в Ti мишенях, бомбардируемых дейтронами при токе разряда $I \sim 300$ мА, коэффициент усиления реакции $d(d,p)t$ составил 10^9 по отношению к значениям выхода определяемым стандартным сечением DD-реакции (приближение Боша-Халле) [8].

Важными факторами, влияющими на усиление протекания ядерных реакций в твердом теле, могут быть различные внешние излучения (электроны, ионы, рентгеновские кванты и др.). Так в [9] было показано, что воздействие пучка электронов с энергией 30 кэВ и рентгеновского пучка с энергией квантов до 120 кэВ инициирует в системах Pd/PdO:D_x и Ti/TiO₂:D_x синтез ядер дейтерия с выходом 3 МэВ протонов.

Ранее в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», мероприятие 1.8. были выполнены работы по теме «Исследование реакций низкоэнергетического взаимодействия пучков ионов и синхротронного излучения с водородосодержащими наносистемами на уникальных установках ФИАН С-60, ГЕЛИС и ПАВИКОМ» (Государственный контракт № 16.518.11.7104 от 27 октября 2011 г.) [10].

В данной статье сообщается о результатах работ по теме «Изучение стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов на уникальных установках ФИАН».

Основной целью этой НИР являлось изучение ядерных процессов, вызываемых частицами низких энергий, присутствующих в высоковольтном разряде или создаваемых ускорителями ионов и электронов, оценка возможности использования таких процессов для термо-ядерной энергетики, а также в астрофизических и иных применениях.

В ходе выполнения работ проведены исследования с использованием уникальных установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р, расположенных на территории Российской Федерации. Показана возможность стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком ионов инертных газов. Измерены выходы ядерных реакций в образцах CVD-алмаза и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия. Показана возможность стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком релятивистских электронов. Измерены выходы продуктов ядерных реакций в процессе высоковольтного разряда и исследована зависимость от формы и материала электродов.

Исследование стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком ионов инертных газов на установке ГЕЛИС

Для детектирования продуктов DD-реакций



использовались многоканальный детектор нейтронов на основе счетчиков с наполнением He-3 и трековый детектор CR-39.

Схемы расположения детекторов и мишени на установке ГЕЛИС показаны на рис. 1.

Облучение мишеней Ti/TiO₂:D_x пучком Ne⁺ проводилось при энергиях 10, 15 и 20 кэВ. Фоновые измерения проводились с мишенями Ti/TiO₂:H_x и Cu. Измерения проводились трековыми детекторами CR-39 и нейтронным детектором на основе He-3 счетчиков.

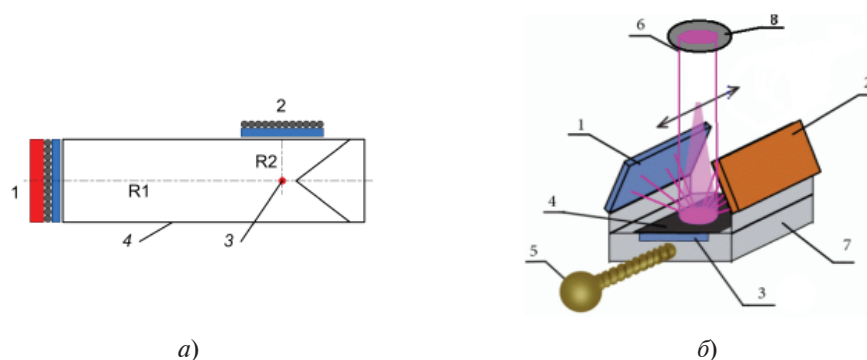


Рис. 1. Схемы расположения детекторов в установке ГЕЛИС

а – схема расположения He-3 детектора: 1 и 2 – первая и вторая группы счетчиков He-3 детектора ($R1 = 85$ см, $R2 = 38$ см), 3 – место расположения мишени, 4 – контуры установки ГЕЛИС;

б – схема расположения мишени и трековых детекторов в пучке ионов: 1, 2, 3 – трековые детекторы CR-39 с различными покрытиями; 4 – мишень; 5 – манипулятор; 6 – пучок ионов; 7 – стальная подложка; 8 – диафрагма

При облучении мишени Ti/TiO₂:D_x толщиной 55 мкм пучком Ne⁺ с энергией 10, 15 и 20 кэВ и током 0.02–0.2 мА, трековые детекторы, расположенные над образцом, показали эмиссию протонов с энергией 3 МэВ, испущенных из мишени против направления пучка на уровне $n_p = 0.25 \text{ с}^{-1}$ (см. распределения на рис. 2, *а*). 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 $n_n = 70 \text{ с}^{-1}$ (см. распределения на рис. 2, *б*). Фоновый образец Ti/TiO₂:H_x не показал при облучении какой либо протонной или нейтронной эмиссии.

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

Увеличение числа треков на обратной стороне детектора по сравнению с передней (рис. 3) 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.

На рис. 4 показаны результаты измерения потока нейтронов детектором He-3 при воздействии пучка Ne⁺ на мишень Ti/TiO:D_x. Фоновые измерения проводились с аналогичными пучками на мишени Cu. Из рис. 4 видно, что при воздействии пучка на мишень Ti/TiO:D_x наблюдается превышение показаний нейтронного детектора над фоновыми значениями.

Средний поток нейтронов, испущенных из мишени в направлении пучка за время облучения, зарегистрирован детектором He-3 на уровне $\langle n_n \rangle = (1.7 \pm 0.4) 10^2 \text{ с}^{-1}$. Эта величина нейтронной эмиссии согласуется по порядку величины с потоком нейтронов, измеренным трековым детектором CR-39.

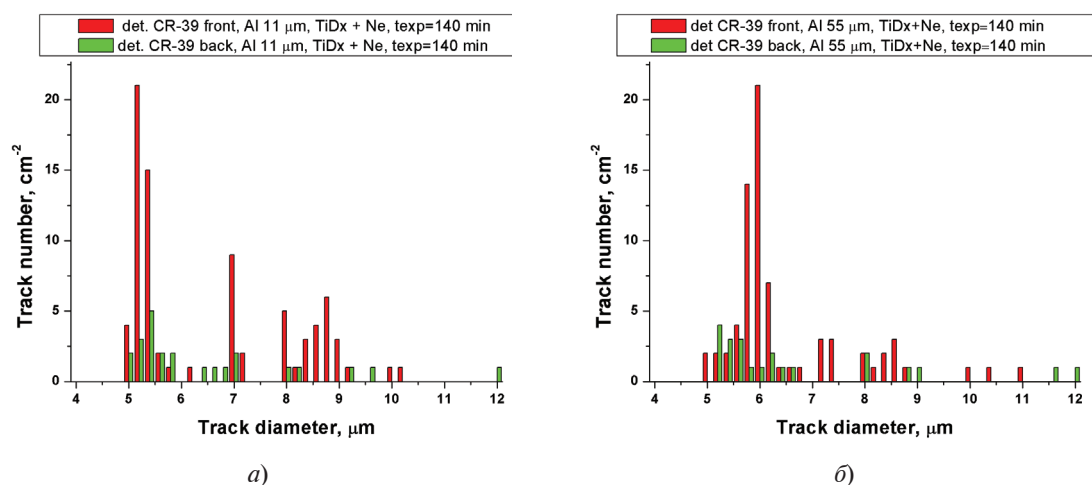


Рис. 2. Распределения диаметров треков на передней (темные столбцы) и задней (светлые столбцы) сторонах детекторов CR-39 с покрытием, расположенных над образцом Ti/TiO₂:Dx, облученным пучком Ne+ (10, 15, 20 кэВ)

a – покрытие 11 мкм Al; *б* – покрытие 25 мкм Cu

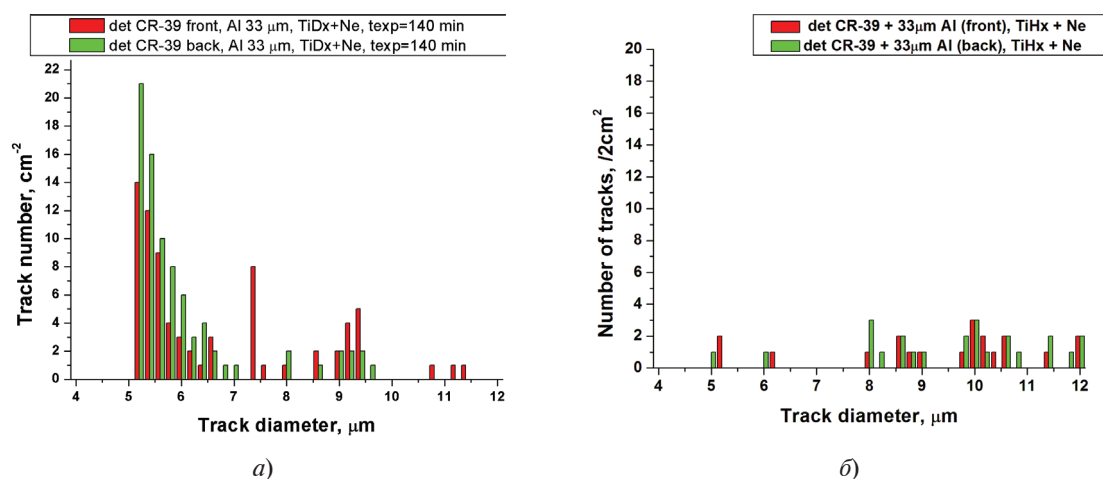


Рис. 3. Распределения диаметров треков на передней (темные столбцы) и задней (светлые столбцы) сторонах детектора с покрытием 33 мкм Al, расположенного под образцом, облученным пучком Ne+ (10, 15, 20 кэВ)

a – образец Ti/TiO₂:Dx, *б* – фоновый образец Ti/TiO₂:Hx

Для расчета выхода DD-реакции из мишени Ti/TiO:D_x при облучении пучком ионов использовалась методика расчета, описанная в [9].

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».

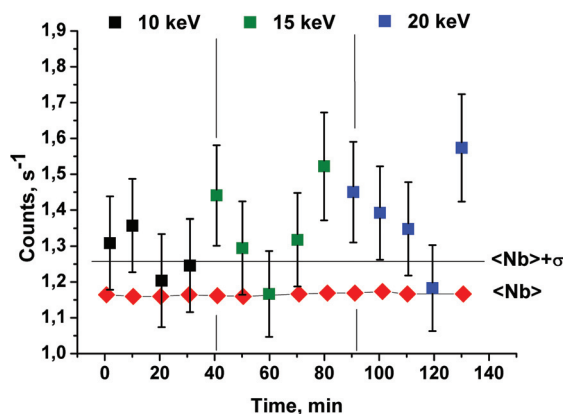


Рис. 4. Счет нейтронного детектора He-3 (■). Мишень – Ti/TiO:D_x, пучок – Ne⁺ (10, 15, 20 кэВ). Средний фон (◆) измерен с мишенью Cu

Потенциал экранирования U_e оценивался по полуэмпирической формуле [11]:

$$U_e = (T/T_0)^{-1/2} [a \ln(y) + b] \quad (3)$$

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, $y_0 = 10 \text{ Me}/D$ – отношение концентраций атомов металла и дейтерия в мишени при $T_0 = 290 \text{ K}$ и $J_0 = 0.03 \text{ mA}/\text{cm}^2$), $J_d = 1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ – 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/TiO₂:D_x, рассчитанный по формуле (3) оказался равен $U_e = 796$ эВ.

На рис. 5 показаны результаты измерения потока нейтронов детектором He-3 при воздействии пучка Ne⁺ с энергией 10, 15 и 20 кэВ на мишень Pd/PdO:D_x. Фоновые измерения проводились с аналогичными пучками на мишени Cu. Из рис. 5 видно, что при воздействии пучка на мишень Pd/PdO:D_x наблюдается превышение показаний нейтронного детектора над фоновыми значениями. Средний поток нейтронов, испущенных из мишени в направлении пучка за время облучения, зарегистрирован детектором He-3 на уровне $\langle n_n \rangle = (3.2 \pm 0.4) 10^2 \text{ s}^{-1}$.

Потенциал экранирования для мишени Pd/PdO:D_x, рассчитанный по формуле (3) оказался равен $U_e = 897$ эВ.

Таким образом, двумя независимыми методами (трековым детектором CR-39 и нейтронным детектором на основе He-3 счетчиков) впервые показано, что воздействие пучка ионов H⁺ или Ne⁺ в диапазоне энергий 10–20 кэВ и токов 0.02–0.2 мА на дейтерированные гетероструктуры Ti/TiO₂:D_x и Pd/PdO:D_x приводит к стимулированию в них выходов DD-реакции.

Исследование выходов ядерных реакций в образцах CVD-алмаза и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия

Исследовалась зависимость выходов DD-реакций из образцов CVD алмаза, графита и карбала (технического углерода) от угла падения пучка на мишень на установке ГЕЛИС. Структура поликристаллического алмаза существенно неоднородна и анизотропна (рис. 6) Кристаллиты растут в виде колонн, ориентированных перпендикулярно поверхности, причем с увеличением толщины пленки «диаметр» колонн увеличивается.

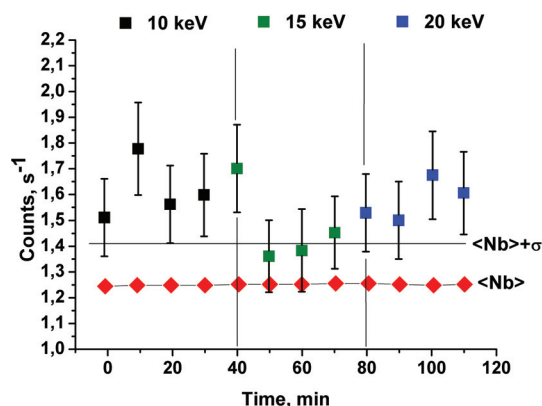


Рис. 5. Счет нейтронного детектора He-3 (■). Мишень – Pd/PdO:Dx, пучок – He+ (10, 15, 20 кэВ). Средний фон (◆) измерен с мишенью Cu

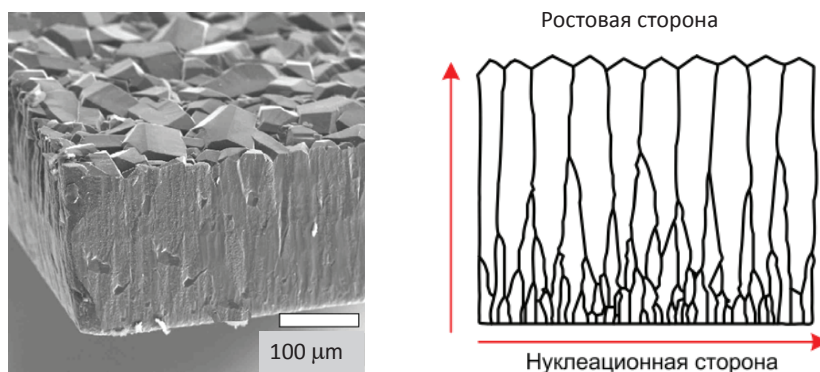


Рис. 6. Структура поликристаллической алмазной пленки в поперечном сечении

Измерялись потоки нейтронов (продуктов DD-реакций) направленных по пучку и поперек пучка ионов дейтерия с помощью нейтронного детектора на основе He-3 счетчиков. Относительный выход DD-реакции определялся по формуле

$$Y_{dd} = n_n / (SI_d), \quad (4)$$

где n_n – поток нейтронов вдоль или поперек пучка, S – площадь мишени под пучком, I_d – ток пучка ионов дейтерия.

На рис. 7 показана зависимость выхода нейтронов из образца CVD-алмаза от угла 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 дейтронов на мишень выход нейтронов примерно в 3 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 измерена зависимость выхода нейтронов из образца NC-20 (80 % алмаз, 20 % графит), который явля-

ется композиционным материалом с изотропной структурой. Было получено, что выход нейтронов из изотропной структуры NC-20 практически не зависит от ориентации образца относительно пучка (рис. 7).

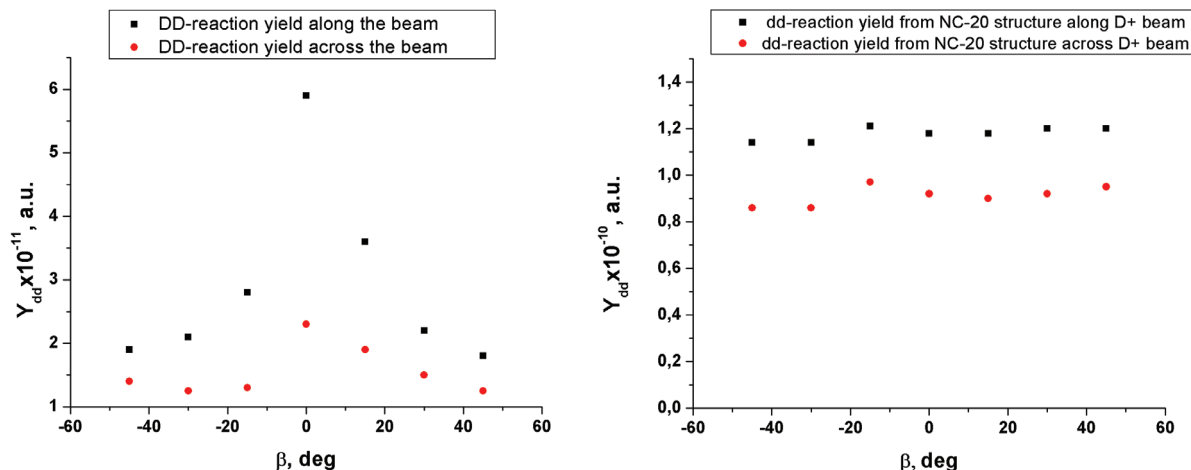


Рис. 7. Зависимость выхода нейтронов из образца CVD-алмаза (слева) и NC-20 (справа) от угла между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени (■ – вдоль пучка, ● – поперек пучка)

При исследовании выхода нейтронов (продуктов DD-реакций) из образцов CVD-алмаза и различных образцов углерода (графит, карбал, NC-20) показано, что ориентация образца в пучке дейтронов оказывает влияние на величину выхода. Таким образом, показана возможность использования образцов CVD-алмаза для генерирования направленных потоков нейтронов.

Исследование стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком релятивистских электронов

Регистрация нейтронов с помощью трековых детекторов CR-39, описанных выше, может применяться и в экспериментах на электронном пучке с энергией 7 МэВ от микротрона-инжектора установки С-25Р. Трековые детекторы позволяют достоверно определить интегральный выход нейтронов из мишени, однако они не дают точной информации о времени прихода нейтрона, а значит об их скорости и энергии. Поэтому вместе с трековыми детекторами в данной НИР был апробирован метод регистрации нейтронов с помощью быстрых сцинтилляционных счетчиков, ранее успешно применяемых группой ФИАН для время-пролетных измерений скоростей частиц.

Непременным условием определения скорости регистрируемого нейтрона по времени пролета некоторой известной базы (длины) является наличие стартового сигнала, привязанного ко времени вылета нейтрона из мишени. В качестве такого сигнала было выбрано попадание в стартовый детектор протона, испускаемого одновременно с нейтроном при электрорасщеплении дейтрона в реакции $e + d \rightarrow e' + n + p$.

В приближении эквивалентных фотонов реакция электрорасщепления протекает через подпроцесс фоторасщепления $\gamma^* + d \rightarrow n + p$, в котором вылетающие нуклоны имеют угловое распределение $\sim \sin^2\theta$. Для наиболее вероятных поперечных углов разлета $\theta \approx 90^\circ$ энергии нейтрона и протона одинаковы и составляют $E_p = E_n = (E_\gamma - E_b)/2$, где $E_b = 2.2$ МэВ – энергия связи дейтрона.

Вылетающие поперек пучка нейтрон и протон обычно имеют энергию около 1 МэВ, и они жестко коррелированы по углам. В системе центра масс $\gamma^* + d$ угол разлета частиц составляет 180° . В лабораторной системе это соответствует углу разлета приблизительно 174° , что определяет оптимальную расстановку детекторов, регистрирующих нейтроны и протоны. Для тонких дейтерированных титановых мишеней с поверхностной плотностью дейтерия $\sim 2.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ожидаемый выход поперечных коррелированных нуклонов в телесный угол $\sim 0.01 \text{ ср}$ при среднем токе электронного пучка 10 мкА составляет приблизительно 13 частиц/сек. Такой выход вполне доступен для наблюдения, но при обязательном условии сильного подавления фона.

Микротрон и выходная магнитная оптика канала обеспечивают в области мишени практически моноэнергетический ($\Delta E/E = 0,001$) 7-МэВ электронный пучок с максимальной интенсивностью до 40 мкА, размером в поперечнике около 1,5 см (FWHM) и начальной расходимостью примерно $\Delta\theta \sim 47 \text{ мрад}$, $\sigma_\theta \sim 20 \text{ мрад}$.

Временная структура пучка микротрона характеризуется импульсами тока электронов средней длительностью 4 мкс с паузой примерно 20 мсек (частота 50 Гц). Внутри отдельных импульсов также существует тонкая банчировка с периодом $\sim 0.33 \text{ нс}$, соответствующим частоте ускоряющего поля в резонаторе 3 ГГц. Для подавления фона от полей СВЧ, генерируемых системой импульсного питания микротрона в первые $\sim 0.5 \text{ мкс}$ импульса, окно для регистрации сигналов от плеч установки не включало эти первые 0.5 мкс.

Максимальная интенсивность, выраженная в числе частиц в секунду — составляет порядка $\sim 2,4 \times 10^{14} \text{ е}^-/\text{сек}$. Такая интенсивность потока электронов создает сильный электромагнитный фон (электроны, гамма-кванты, позитроны) с энергетическим спектром практически от нуля вплоть до 7 МэВ в зоне, непосредственно прилегающей к микротрону. Так как плоскость, перпендикулярная оси электронного пучка, менее загружена фоновыми частицами и излучениями, это (а также условия ограниченного пространства вблизи микротрона и синхротрона) предопределяет общую конфигурацию расположения протонного и нейтронного плеч установки примерно на одной вертикали — как показано на рис. 8.

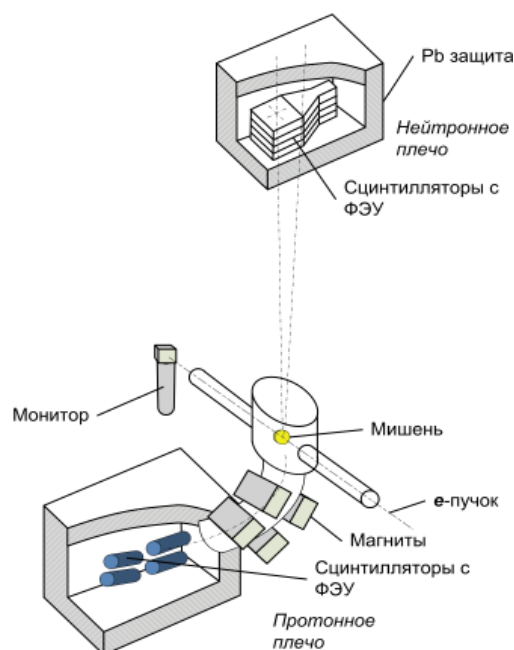


Рис. 8. Схема расположения элементов установки

Серьезным фоном, препятствующим измерениям с пластиковыми детекторами, является электромагнитный фон, создаваемый в зале работающим микротроном, и фон от излучения электронов, попадающих на вещество. Тестовые измерения фоновых условий, выполненные на начальной стадии работы, позволили подобрать место между микротроном-инжектором и кольцом синхротрона, где этот фон минимален. Однако и там оказалось необходимым дополнительно экранировать все сигнальные кабели от мощных электромагнитных наводок. Кроме того, в течение первых ~ 0.5 мкс каждого импульса микротрона, когда электромагнитное поле в микротроне было максимальным, сигналы детекторов не регистрировались.

Другим серьезным фоном, препятствующим измерениям, является фон, создаваемый 7 МэВ электронами, рассеиваемыми в мишени на большие углы. Для борьбы с этим фоном использовалась свинцовая защита, закрывающая счетчики, а также поле постоянных магнитов силой около 520 Гс, разводящее электроны и протоны в разные стороны.

Из-за сильного торможения протонов низких энергий даже в тонких слоях вещества оказалось невозможным закрывать протонный сцинтилляционный счетчик от случайных фотонов обычно применяемыми толстыми фильтрами (черной бумагой) или фольгами. Один из примененных вариантов подавления этого фона состоял в напылении на пластик тонкого (около 1 мкм) слоя серебра или алюминия.

Для реализации время-пролетных измерений предусматривалась разная длина протонного и нейтронного «плеч» детектора (около 1 м и 1.7 м, соответственно). При условии одинаковости энергий протона и нейтрона, одновременно вылетающих из мишени в процессе электрорасщепления дейтрона, измеряемая разность времен прохождения частицами этих «плеч» может служить информацией об энергии частиц. Например, для энергии нуклонов 1 МэВ, которая соответствует импульсу 43 МэВ/с и скорости $\beta = 0.046$, время запаздывания нейтронов относительно протонов на разнице длин пробега 0.7 м составляет 53 нс.

Для тестирования способности установки регистрировать протон-нейтронные совпадения были произведены измерения скорости регистрации совпадения сигналов от нейтронного и протонного «плеч». В отсутствие мишени эта скорость была пренебрежимо мала, что доказывает достаточную степень защиты счетчиков от фонов, которые создает микротрон и гало электронного пучка. Затем измерения были выполнены с установленной дейтерированной углеродной мишенью ($C:D_x$).

Временные диаграммы сигналов в нейтронном и протонном «плечах» установки в предположении регистрации нейтронов с энергией 1 и 2.45 МэВ и протонов с энергией 1 и 3 МэВ приведены на рис. 9, а-б.

С мишенью $C:D_x$ была изучена временная корреляция регистрируемых частиц в n и p «плечах» установки. Для этого в электронные каналы «плеч» вводились дополнительные задержки τ_n и τ_p и определялась зависимость скорости счета совпадений — при фиксированном размере временного окна схемы совпадений 10 нс — от разности $\tau = \tau_p - \tau_n$. Эта зависимость, измеренная с шагом 32 нс, показана на рис. 9, в. Наблюдаемый максимум при τ около 40–50 нс примерно соответствует теоретической разности времени пролета нейтронного и протонного плеча нуклонами с энергией около 1 МэВ, приведенной выше, что служит косвенным доказательством действительного наблюдения на созданной установке вылета np пар от реакции электрорасщепления дейтрона. Большая ширина пика (от 0 до 60 нс) говорит о совпадении сигналов нейтронов с энергией 2.45 МэВ и протонов с энергией 3 МэВ ($\tau_p - \tau_n \approx 11$ нс), а также нейтронов с энергией 1 МэВ и протонов с энергией 3 МэВ ($\tau_p - \tau_n \approx 31$ нс). Второй (левый) пик на рисунке отвечает разности задержек $\tau = \tau_p - \tau_n \approx -96$ нс. Это близко времени запаздывания протонов с энергией около 1 МэВ относительно нейтронов с энергией 2.45 МэВ на разнице длин пробега 0.7 м (93 нс), что указывает на наблюдение нейтронов — продуктов DD-реакции в данном эксперименте.

Исследования проводились на микротроне С-25Р при энергии пучка электронов 7 МэВ и токе пучка 5 мкА. Использовались мишени CD_x , $Ti/TiO_2:D_x$, $Pd/PdO:D_x$ и фоновая мишень

Ti/TiO₂. Измерялись протонная и нейтронная эмиссии от мишеней, стимулированные пучком электронов. Измерение проводилось с помощью нейтронного детектора для время-пролетных измерений.

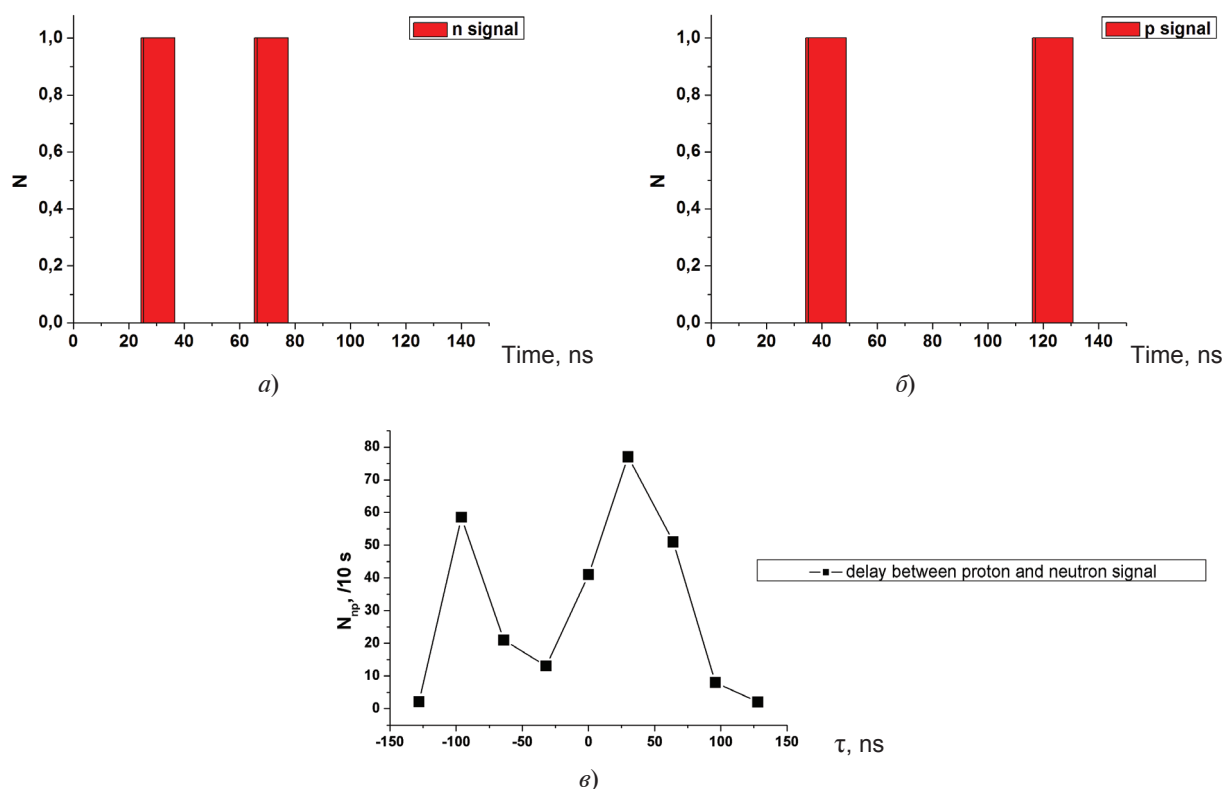


Рис. 9. Временные диаграммы сигналов

a — в нейтронном плече установки; *б* — протонном плече установки; *в* — зависимость скорости счета совпадений в *n*- и *p*-плечах установки от дополнительной относительной задержки $\tau = \tau_p - \tau_n$ для мишени C:D_x

Распределения количества отсчетов двойных совпадений протонного и нейтронного каналов время-пролетного нейтронного детектора за время 10 с во временном окне 10 нс (N_{np}), измеренные с мишенями CD_x, Ti/TiO₂:D_x, Pd/PdO:D_x и фоновой мишенью Ti/TiO₂, приведены на рис. 10. Из распределений видно, что средний счет детектора во время облучения дейтерированных мишеней в 2–4 раза превосходит счет с фоновой мишенью. С учетом эффективности детектирования нейтронов, можно оценить поток нейтронов, испускаемый из мишени под действием пучка электронов. Эти данные приведены в таблице.

Потоки нейтронов, испускаемые из различных мишеней под действием пучка электронов

Мишень, толщина (мкм)	Средний счет совпадений, $\langle N_{np} \rangle$, 1/10с	Концентрация дейтерия в мишени, N_d , см ⁻³	Средний поток нейтронов из мишени. $\langle n_{np} \rangle$, с ⁻¹ в 4π ср
CD _x (1500)	45 ± 15	10^{20}	$\sim 6 \times 10^5$
Pd/PdO:D _x (50)	84 ± 53	10^{22}	$\sim 10^6$
Ti/TiO ₂ :D _x (55)	45 ± 20	10^{19-20}	$\sim 6 \times 10^5$
Ti/TiO ₂ (55)	23 ± 12	0	—

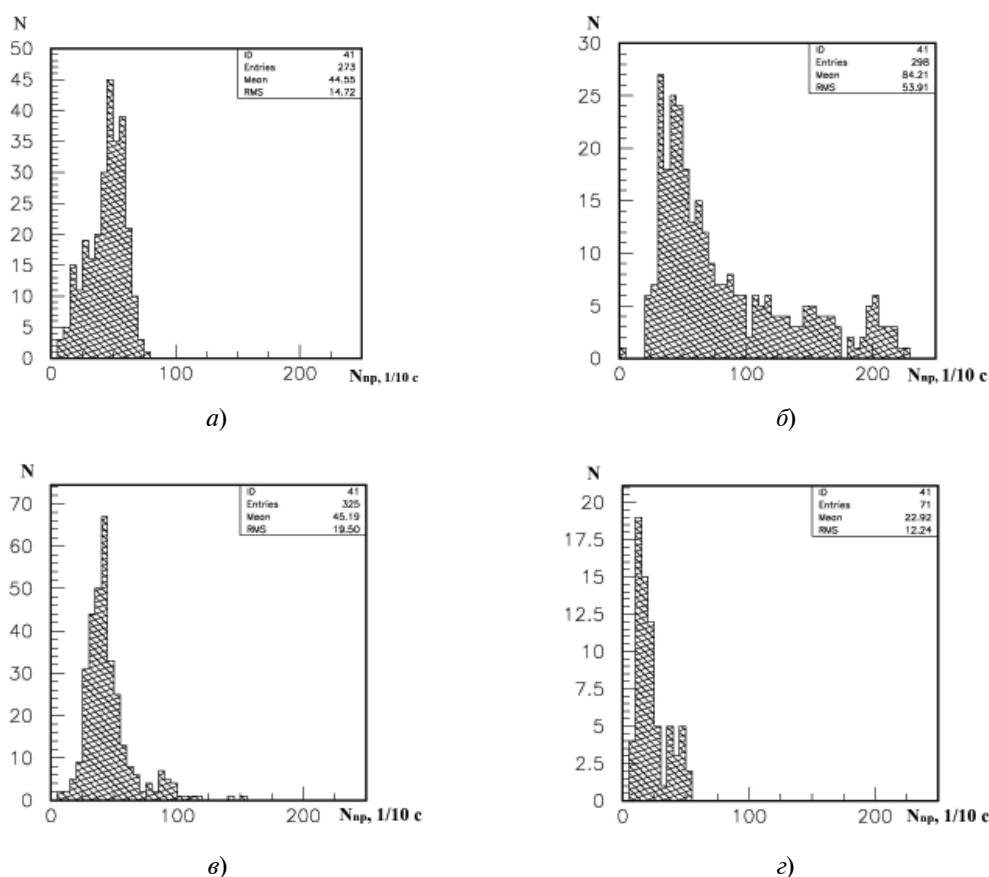


Рис. 10. Распределения количества отсчетов двойных совпадений протонного и нейтронного детекторов за время 10 с во временном окне 10 нс (N_{np}), измеренные с мишенями CD_x (а), $Pd/PdO:D_x$ (б), $Ti/TiO_2:D_x$ (в) и фоновой мишенью Ti/TiO_2 (г)

Измерение выходов продуктов ядерных реакций в высоковольтном разряде на установке ЭРГ

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе ЭРГ, реконструированном для исследований высоковольтного разряда в воздухе [12]. Схема эксперимента приведена на рис. 11. Напряжение амплитудой до 1 МВ, формируемое в генераторе импульсных напряжений (ГИН) Аркадьева-Маркса с энергией 60 кДж, подается через проходной масловоздушный изолятор на дюралевый фланец со сменными электродами (катодами), и обеспечивает ток атмосферного разряда 10–15 кА. Диаметр внешнего заземленного цилиндрического токопровода ограничивает допустимое расстояние между катодом и анодом на уровне 1 м. Анодный фланец может перемещаться вдоль оси системы для плавного изменения зазора. Для анодов и катодов применялся один и тот же набор сменных электродов.

Электрофизические диагностики включали запись осциллограмм токов (анодный шунт, пояса Роговского), напряжения (активный и емкостной делители), азимутального магнитного поля (магнитные зонды) с полосой пропускания 200 МГц. Формирование каналов разряда контролировалось с помощью интегральной съемки в оптическом диапазоне с двух ракурсов.

Для регистрации интегрального потока нейтронов использовались трековые детекторы CR-39 производства японской фирмы Fukuvi Chemical Industry, нечувствительные к электромагнитным помехам. Трековые детекторы CR-39 располагались вблизи зоны разряда как показано на рис. 11.

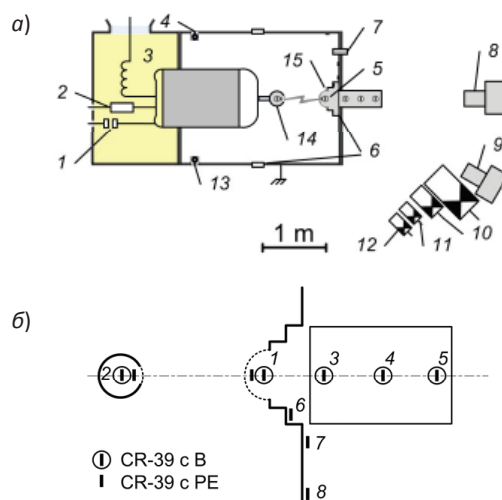


Рис. 11. Схема эксперимента

а – схема установки с системами диагностики: 1, 2 – емкостный и активный делители, 3 – ввод высокого напряжения от ГИНа, 4, 13 – магнитные зонды, 5 – трековые детекторы, 6 – шунты тока, 7 – пояс Роговского, 8, 9 – интегральные фотокамеры, 10 – сцинтилляционные детекторы, 11 – детектор УФ излучения, 12 – ФЭУ на видимый свет, 14 – катод, 15 – анод;

б – схема расположения трековых детекторов CR-39 (детектор 1 расположен внутри анода, детектор, 2 – внутри катода, детекторы 3, 4 и 5 размещены в воде, детекторы 6, 7, 8 – за стальным уголком на разных расстояниях от разряда, фоновые детекторы располагались в ~10 м от зоны разряда)

В серии разрядов из 180 выстрелов трековые детекторы CR-39, размещенные внутри сечного электрода (анода) и сферического катода показали превышение над фоном. Распределения диаметров треков заряженных частиц на детекторах показаны на рис. 12. Для построения распределений отбирались треки круглой формы с углом падения, близким к нормали. Так, например, детектор CR-39 с РЕ радиатором 120 мкм, размещенный внутри анода, показал превышение над фоном в ~5 раз в интервале диаметров треков протонов отдачи 4–6 мкм (рис. 12, а). При этом средний поток быстрых нейтронов в области детектора составил $\langle nn_1 \rangle = 2 \times 10^5 \text{ н/см}^2$ на выстрел. Аналогичный детектор, размещенный внутри катода, также показал превышение над фоном в интервале диаметров треков протонов отдачи 4–6 мкм (рис. 12, б). При этом средний поток быстрых нейтронов, оцененный по протонам отдачи, в области детектора составил $\langle nn_1 \rangle = 2.4 \times 10^5 \text{ н/см}^2$ на выстрел. Детектор внутри анода, помещенный в 20 % раствор тетрабората Na в глицерине, в интервале диаметров треков альфа-частиц ($E_\alpha < 2 \text{ МэВ}$) 10–12 мкм также показал превышение над фоном (рис. 12, в). При этом средний поток тепловых нейтронов в области детектора, оцененный по реакции (1), составил $\langle nn_2 \rangle = 6 \times 10^5 \text{ н/см}^2$ за выстрел. На этом детекторе наблюдалось превышение над фоном и в интервале диаметров треков протонов отдачи 4–6 мкм. Сравнение измерений детекторов 1 и 3, регистрирующих тепловые нейтроны, показывает, что, несмотря на увеличение расстояния от зоны разряда, поток тепловых нейтронов на дальнем детекторе (рис. 12, г) больше, чем на ближнем (с меньшей толщиной замедлителя). Возможно, что в разряде первичными являются быстрые нейтроны, которые затем замедляются в воде до тепловых энергий.

На детекторе 1 (2 см²), расположенном вблизи анода, найдено 10 событий распада ядра C-12 на 3 α -частицы (рис. 13), число 3α -событий $N_{3\alpha} = 5 \text{ см}^{-2}$ при фоне $N_{bg3\alpha} = 0.2 \text{ см}^{-2}$. Средний поток нейтронов с энергией $E_n > 10 \text{ МэВ}$ в области детектора, оцененный по реакции $^{12}\text{C} + n \rightarrow 3\alpha + n'$, которая имеет порог около 10 МэВ, составил $\langle n_{n3} \rangle = 1.4 \times 10^5 \text{ н/см}^2$ на выстрел. На остальных детекторах, расположенных вблизи разряда, $N_{3\alpha} = 1\text{--}4 \text{ см}^{-2}$.

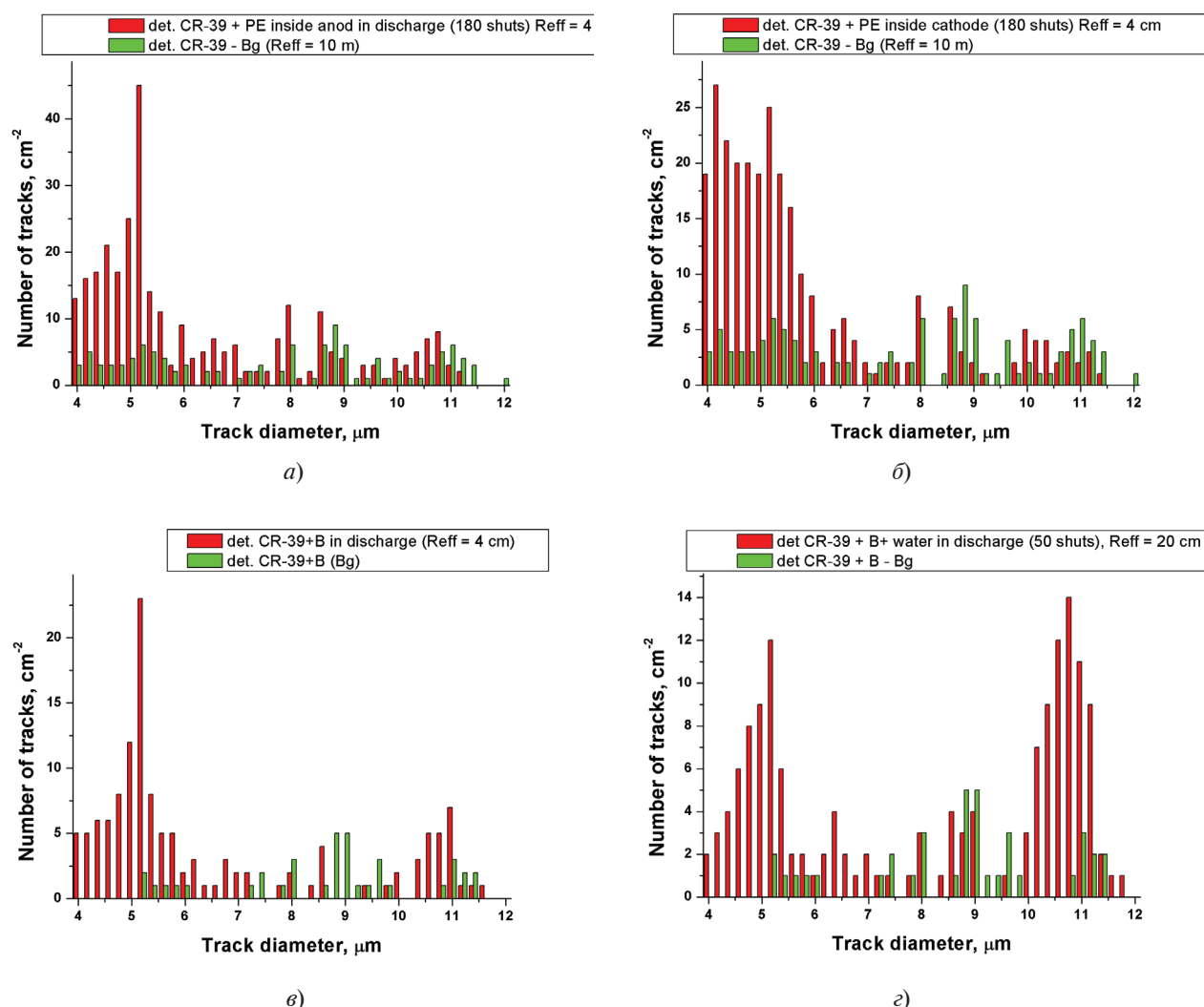


Рис. 12. Суммарные распределения диаметров треков (темными столбцами выделены результаты измерений после серии разрядов, светлыми — в соответствующих фоновых детекторах, размещенных в 10 м от разряда)

a — на детекторах, расположенных в аноде, и *б* — на детекторах, расположенных в катод, с радиаторами из 120 мкм полиэтилена; *в* — на детекторах с радиатором из 20 % раствора тетрабората Na в глицерине; *з* — на детекторах в 20 % растворе тетрабората Na в глицерине с дополнительным водяным радиатором, размещенных вблизи анода

Статистика детекторов CR-39 показывает экспоненциальный спад ($\exp[-r/18.4]$, рис. 14) потока быстрых нейтронов с расстоянием r (см) от первого детектора, помещенного в анод. Поток спадает медленнее, чем по закону $1/r^2$. Наблюдаемое отклонение может быть объяснено распределенным в катод-анодном промежутке источником нейтронов.

Зависимость плотности потока нейтронов от расстояния имеет вид экспоненциального спада по закону:

$$y = A_1 \cdot \exp(-r/t_1) + y_0, \quad (5)$$

где $y_0 = -240$, $A_1 = 137\,000$, $t_1 = 18.4$.

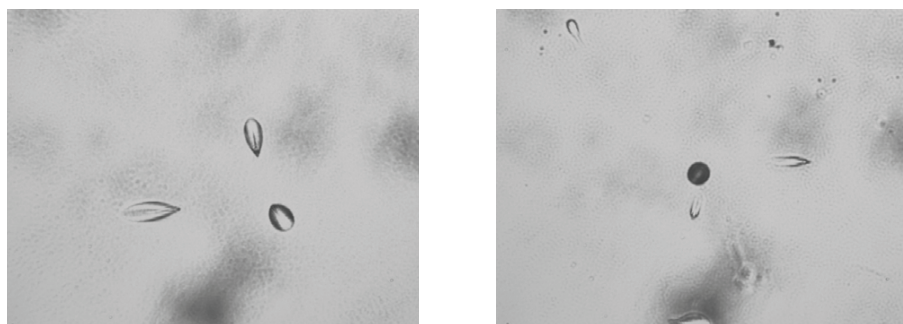


Рис. 13. Микрофотографии событий распада ядра С-12 на 3 α -частицы (размер изображения 130×100 мкм)

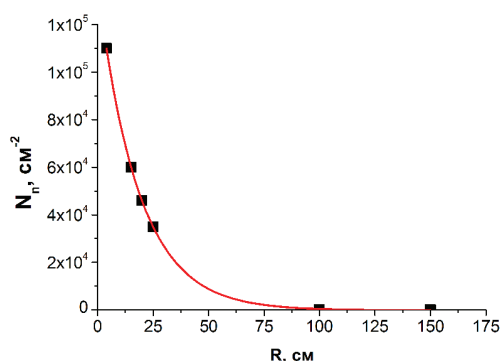


Рис. 14. Зависимость плотности потока нейтронов от расстояния

Для детектирования быстрых нейтронов использовался пластический сцинтиллятор на основе полистирола с добавкой РОРОР, чувствительный к быстрым нейтронам, имеющий форму параллелепипеда $150 \times 150 \times 55$ мм³. Собственная эффективность детектора к быстрым нейтронам, измеренная с помощью источника ²⁵²Cf, оказалась равной $\eta_{int} = 0.17$.

Схема детектирования нейтронов в режиме реального времени показана на рис. 15. Детекторы располагались на расстоянии ~ 150 см от зоны разряда. Один детектор имел покрытие из 50 мкм Al фольги и мог регистрировать импульсы от рентгеновских гамма-квантов ($E_\gamma > 10$ кэВ) и нейтронов ($E_n > 1$ МэВ). Другой имел дополнительную защиту из 10 см Pb.

В момент разряда оба детектора показали наличие сигналов. Начало сигнала (предположительно, от быстрых нейтронов) на втором детекторе с защитой из 10 см Pb задержано относительно первого сигнала (от гамма-квантов) на 35 нс. Оценивая энергию нейтронов по времени пролета расстояния 150 см, получаем $E_n \sim 10$ МэВ. Формы нейтронных импульсов примерно одинаковые для всех событий. Вне ширины импульсов рентгеновского излучения импульсов нейтронов не наблюдалось. Ширина и амплитуда нейтронных импульсов меняется в широких пределах внутри импульса рентгеновского излучения. Временная задержка нейтронного импульса относительно импульса РИ лежит в более узком интервале. По этой задержке можно оценить диапазон энергий нейтронов без определения местоположения источника. В предположении одновременной генерации РИ и нейтронов, средняя энергия нейтронов составляет 17 ± 6 МэВ (рис. 15).

Геометрический фактор, определяемый размерами сцинтиллятора и расстоянием от разряда, составляет $\approx 8 \times 10^4$. Тогда, исходя из предположения $\sim 10^6$ быстрых нейтронов за им-

пульс в 4π ср, с учетом геометрического фактора и поглощения в свинце до сцинтиллятора дойдет ~ 250 нейтронов. С учетом собственной эффективности импульс ФЭУ будет суперпозицией примерно 40 одинарных (~ 500 мВ) импульсов, т.е. должен иметь амплитуду примерно 20 В (при точном наложении) или с меньше, но с пропорционально увеличенным интегралом импульса.

Введение дополнительного замедлителя нейтронов (~ 20 см полиэтилена) привело к исчезновению сигнала от быстрых нейтронов на втором детекторе (рис. 15), что согласуется с выводом о том, что в момент разряда излучаются и быстрые нейтроны.

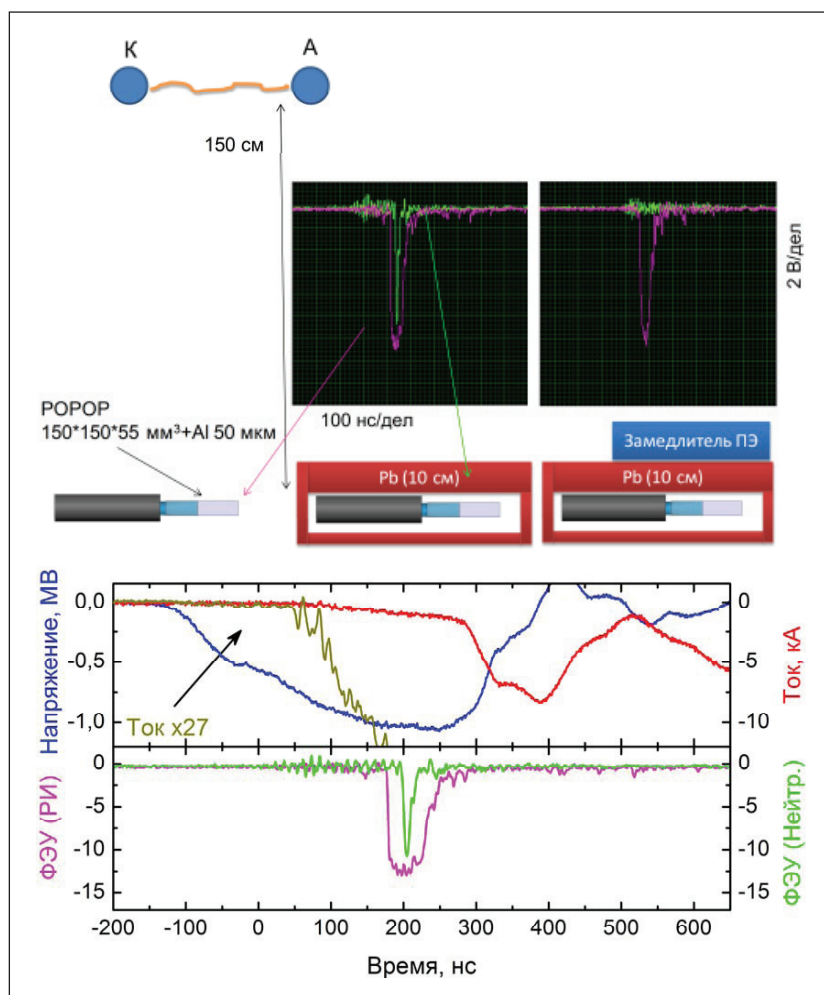


Рис. 15. Схема детектирования нейтронов в реальном времени (вверху) и временные диаграммы импульсов напряжения, тока и рентгеновского излучения и нейтронного сигнала (внизу)

Как видно из рис. 15, формирование потока нейтронов происходит на предимпульсе тока до формирования основного разряда. Амплитуда предимпульса к моменту генерации нейтронов в 27 раз меньше амплитуды основного импульса тока. Появление импульса нейтронного излучения задержано по отношению к импульсу γ -излучения на 35 нс.

Оценка энергии нейтронов проводилась следующим образом. Энергия нейтронов E_n в эВ связана со временем t в мксек соотношением:

$$E_n = (72,3L)^2/t^2, \quad (6)$$

где t – интервал времени между нейтронной вспышкой и моментом попадания нейтрона в детектор, т.е. время пролета нейтронами расстояния L (в метрах) от источника до детектора.

По этому времени пролета можно оценить диапазон энергий нейтронов без определения местоположения источника. В предположении одновременной генерации РИ и нейтронов, средняя энергия нейтронов составляет 17 ± 6 МэВ (рис. 16).

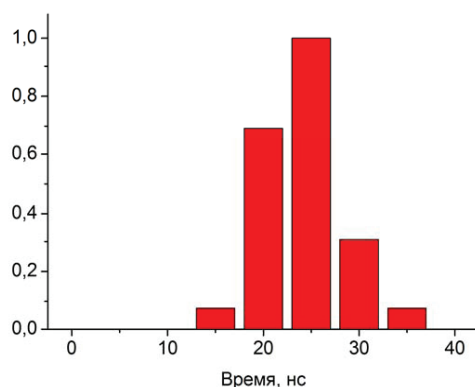


Рис. 16. Распределение времени пролета нейтронов

$$\begin{aligned} \langle t \rangle &= 26.2 \text{ ns}; \sigma(t) = 4.2 \text{ ns}; E(t = 22) = 24 \text{ MeV}; \\ E(t = 26.2) &= 17 \text{ MeV}; E(t = 30.4) = 12.7 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Таким образом, двумя независимыми методами (трековым детектором CR-39 и детектором на основе пластического сцинтиллятора с ФЭУ) установлено, что в процессе высоковольтного разряда в воздухе эмитируются нейтроны, которые являются продуктами пока неизвестных ядерных реакций, с интенсивностью $\sim 10^6$ нейтронов за выстрел в 4л ср. Полученные данные позволяют предположить, что в процессе разряда образуются быстрые нейтроны, причем их генерация происходит в начальной фазе разряда и коррелирована с генерацией квантов жесткого рентгеновского излучения. Не наблюдается генерации нейтронов, не сопровождающейся жестким рентгеновским излучением. Поток быстрых нейтронов падает экспоненциально и медленнее, чем по закону $1/r^2$ с расстоянием от ближайшего к разряду детектора CR-39. наблюдаемое отличие может быть связано с нелокальностью источника нейтронов, распределенного в промежутке катод-анод.

Для объяснения механизма наблюдаемой эмиссии нейтронов и уточнения пространственных характеристик их источника требуется проведение дополнительных экспериментов. Для получения спектра энергии нейтронов нужно установить положение (положения) нейтронного источника. Для этого необходимы детальные и полные времяпролетные измерения, дополнительные детекторы нейтронов на основе ^3He и ZnS счетчиков, частичное или полное экранирование области разряда, применение различных замедлителей и конверторов для увеличения чувствительности по нейтронному потоку в широком диапазоне энергий. Подлежит исследованию возможная анизотропия нейтронного излучения. С другой стороны, показано влияние средних и локальных электрических полей, параметров атмосферы.

В настоящее время нет приемлемой модели или механизма, объясняющего генерацию нейтронных вспышек в атмосферном разряде в воздухе. Отдельной проблемой является происхождение нейтронов с энергией более 10 МэВ.

Выход продуктов ядерных реакций в высоковольтном разряде с дейтерированным заостренным катодом на установке ЭРГ

В данном эксперименте мишень в виде дейтерированной электролизом до насыщения стальной иглы использовалась в качестве острого катода. Анод в виде сетчатой полусферы со встроенным токовым шунтом. Для уменьшения азимутальной неоднородности поля в промежутке и увеличения ширины области сильного поля применен дополнительный потенциальный электрод в виде обращенного конуса.

В серии из 50 выстрелов с регистрацией сцинтилляционными детекторами импульсы РИ на предпробойной стадии зарегистрированы в 44 выстрелах. Импульсы нейтронного излучения на предпробойной стадии зарегистрированы в 16 выстрелах. Во всех случаях импульсы нейтронов лежат внутри контура импульсов РИ. В среднем, фронт нейтронного импульса отстоит от импульса РИ на 25 ± 5 нс, как наблюдалось и ранее в сериях разрядов со сферическими электродами различных радиусов и с чистым заостренным катодом (без насыщения дейтерием).

Основным отличием серии с дейтерированным острием-иглой в качестве катода явилось появление импульса второго импульса нейтронов. В трех случаях из всех нейтронных событий по серии нейтронные импульсы-двойники особенно выражены. В нескольких импульсах присутствует, по-видимому, только второй импульс. Появление второго импульса свидетельствует о дополнительном механизме генерации нейтронов, связанном с наличием высокой концентрации, до 10^{22} см^{-3} , дейтерия в поверхностных слоях материала острого.

На рис. 17 приведены типичные осциллограммы хорошо различимых двойных импульсов нейтронов с дейтерированным острием-иглой в качестве катода. Расстояния по времени между максимумами импульсов составляют 22–45 нс. В предположении о том, что первый по времени импульс соответствует ранее исследованной вспышке нейтронов со средней энергией ~17 МэВ, второй импульс можно отнести к группе нейтронов меньшей энергии, но рожденной одновременно с первой группой.

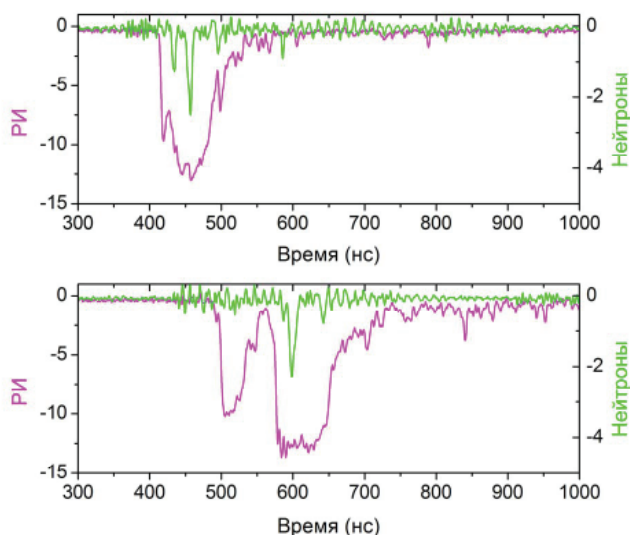


Рис. 17. Типичные осциллограммы двойных нейтронных импульсов (разница по времени между максимумами 22–45 нс)

Энергия нейтронов E_n в эВ связана со временем t в мкс соотношением:

$$E_n = (72,3L)^2/t^2,$$

где t – время переноса частицы на расстояние L (в метрах).

Рассчитаем время переноса нейтронов от разрядного промежутка до детектора для установки ЭРГ. Характерное расстояние от ближайшего электрода (анода) до поверхности сцинтиллятора составляет 1,5 м.

Исходя из зависимости времени пролета нейтронов от их энергии:

$$t_1 = (72,3 \cdot L) \cdot (1,5 \cdot 10^7)^{-1/2} = 26 \text{ нс для } E_n = 17 \text{ МэВ},$$

$$t_2 = (72,3 \cdot L) \cdot (2,5 \cdot 10^6)^{-1/2} = 69 \text{ нс для } E_n = 2,5 \text{ МэВ (DD нейтрон)},$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 43 \text{ нс}.$$

Следовательно, в случае одновременной генерации нейтронов с разной энергией (17 и 2,5 МэВ) детектор зафиксирует два импульса с разницей по времени приблизительно 43 нс. Таким образом, второй импульс может быть связан со стимуляцией DD реакции в материале мишени. Наблюдаемые также меньшие временные задержки (на ~20 нс), вероятно, связаны со временами развития стимулированных процессов, но могут быть отнесены и к генерации нейтронов больших энергий.

Таким образом, показано, что воздействие высоковольтного разряда на дейтерированную мишень приводит к стимулированию DD-реакции с выходом 2.5 МэВ-ных нейтронов. При этом также происходит стимулирование генерации нейтронов с энергией > 10 МэВ, связанной с пока неизвестными процессами в высоковольтном разряде в воздухе.

Заключение

В результате выполнения НИР исследованы методы воздействия ионизирующего излучения (пучки ионов, электронов) на водородосодержащие гетероструктуры палладия и титана, предназначенные для повышения вероятности протекания ядерных реакций. Получены результаты, способствующие пониманию процессов ядерного синтеза в твердом теле при низких энергиях взаимодействующих частиц, стимулированного внешними ионизирующими излучениями и электрическими разрядами.

Установлено, что воздействие мощного электрического разряда на поверхность дейтерированной мишени приводит к усилению выхода DD-реакции.

Также установлено, что в процессе высоковольтного разряда в воздухе эмитируются нейтроны с энергией > 10 МэВ, которые являются продуктами пока неизвестных ядерных реакций, с интенсивностью $\sim 10^5$ нейтронов за выстрел в 4π ср. Полученные данные позволяют предположить, что в процессе разряда образуются быстрые нейтроны, причем их генерация происходит в начальной фазе разряда и коррелирована с генерацией квантов жесткого рентгеновского излучения.

Результаты НИР могут иметь целый ряд практически важных применений, касающихся создания источников энергии на новых принципах (ядерный синтез при низких энергиях, безнейтронный синтез), синтезе новых материалов (локальное комбинированное воздействие жесткими излучениями и током высоковольтного разряда), выработки норм радиационной безопасности в высотной атмосфере и стратосфере (процессы генерации нейтронного и гамма-излучения в атмосфере), помехоустойчивости низкоорбитальной и стратосферной техники (радио-, рентгеновское и гамма-излучение так называемых гигантских и высотных атмосферных разрядов в стратосфере и ионосфере).

По результатам НИР опубликовано 5 научных статей [13–17].

Авторы выражают глубокую благодарность В.А. Богаченкову, А.И. Львову, В.Г. Ральченко, К.В. Шпакову за помощь при проведении экспериментов. Авторы также признательны А.В. Агафонову, С.С. Герштейну, А.В. Гуревичу и Г.А. Месяцу за обсуждение научных проблем, затронутых в статье.

*Работа выполнена при поддержке Минобрразования России
(Государственный контракт № 14.518.11.7075 от 18 июня 2013 г).*

Список литературы

1. Yuki H., Sato T., Kasagi J., et al. The D+D reactions in metal at bombarding energies below 5 keV. J.Phys.G: Nucl. Part. Phys.. 1989. 23. 1459.
2. Aliotta M., Raiola F., Gyurky G., et al. Electron screening effect in the reactions $^3\text{He}(d,p)^4\text{He}$ and $d(^3\text{He},p)^4\text{He}$. Nucl. Phys. 2001. A690. 790.
3. Czerski K., Hulke A., Biller A., et al. Enhancement of the electron screening effect for $d+d$ fusion reactions in metallic environments. Europhys. Lett. 2001. 54. 449.
4. Raiola F., Migliardi P., Gyurky G., et al. Enhanced electron screening in $d(d, p)t$ for deuterated Ta*. European Physical Journal. 2002. A13. 377.
5. Raiola F., Migliardi P., Gang L., et al. Electron screening in $d(d,p)t$ for deuterated metals and the periodic table. Physics Letters. 2002. B547. 193.
6. Yuki H., Kasagi J., Lipson A.G., et al. Anomalous enhancement of DD reaction in Pd and Au/Pd/PdO heterostructure targets under low-energy deuteron bombardment. JETP Lett. 1998. 68. 785.
7. Lipson A.G., Roussetski A.S., Karabut A.B., Miley G.H. Усиление DD-реакции и генерация рентгеновского излучения, в сильноточном импульсном тлеющем разряде в дейтерии с Ti катодом при напряжениях 0,8–2,45 кВ. ЖЭТФ (2005) 127, 6, с. 1334–1349. JETP (2005)100, 1175.
8. Bosch H.S., Halle G.M.. Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities. Nucl. Fusion. 1994. 32. 611.
9. Чернов И.П., Русецкий А.С., Краснов Д.Н. и др. Ядерные реакции в системах Pd/PdO:D_x и Ti/TiO₂:D_x при их возбуждении ионизирующим излучением // ЖЭТФ, (2011), 139, 6, с. 1088–1097. JETP, 2011, v. 112, 6, p. 952–960.
10. Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С. Исследование реакций низкоэнергетического взаимодействия пучков ионов и синхротронного излучения с водородосодержащими наносистемами на уникальных установках Фиан С-60, ГЕЛИС и ПАВИКОМ // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2013. № 1 (10), с. 34–39.
11. Липсон А.Г., Чернов И.П., Русецкий А.С. и др. Десорбция «горячих» атомов дейтерия из гетероструктуры Pd/PdO:D_x при возбуждении ее водородной подсистемы // ДАН, (2009), т. 425, с. 621–625.
12. Огинов А.В., Чайковский С.А., Богаченков В.А., Шпаков К.В. Рентгеновское и ультрафиолетовое излучение фаз разряда длинной искры // Научная сессия МИФИ-2010. Сборник научных трудов. Т. II, М., 2010, с. 92–95.
13. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П. Исследование выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D_x при низких энергиях на установке ГЕЛИС // Краткие сообщения по физике ФИАН. (2012) № 9, с. 3–12.
14. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П. Исследование выходов DD-реакций из гетероструктуры Ti/TiO₂:D_x при низких энергиях на установке ГЕЛИС // Краткие сообщения по физике ФИАН. (2012) № 12, с. 3–10.
15. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А. и др. Исследование стимулирования выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D_x пучками ионов H⁺ и Ne⁺ на установке ГЕЛИС // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. № 10, с. 15–18.
16. Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А. и др. Стимулирование выходов DD-реакций из гетероструктуры Ti/TiO₂:D_x пучками ионов H⁺ и Ne⁺ на установке ГЕЛИС // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. 2013. № 11. С. 3–8.

17. Agafonov A.V., Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Oginov A.V., Rusetskiy A.S., Ryabov V.A., Shpakov K.V. Observation of Neutron Bursts Produced by Laboratory High-voltage Atmospheric Discharge. *Physical Review Letters*. 2013, т. 111, № 11, с. 115003.

18. Agafonov A.V., Oginov A.V., Shpakov K.V. Prebreakdown Phase in Atmospheric Discharges, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2012, vol. 9, no. 4–5, pp. 380–383.

References

1. Yuki H., Sato T., Kasagi J., et al. The D+D reactions in metal at bombarding energies below 5 keV. *J.Phys.G: Nucl. Part. Phys.*. 1989. 23. 1459.

2. Aliotta M., Raiola F., Gyurky G., et al. Electron screening effect in the reactions $^3\text{He}(d,p)^4\text{He}$ and $d(^3\text{He},p)^4\text{He}$. *Nucl. Phys.* 2001. A690. 790.

3. Czerski K., Hulke A., Biller A., et al. Enhancement of the electron screening effect for d+d fusion reactions in metallic environments. *Europhys. Lett.* 2001. 54. 449.

4. Raiola F., Migliardi P., Gyurky G., et al. Enhanced electron screening in d (d, p)t for deuterated Ta*. *European Physical Journal*. 2002. A13. 377.

5. Raiola F., Migliardi P., Gang L., et al. Electron screening in d(d,p)t for deuterated metals and the periodic table. *Physics Letters*. 2002. B547. 193.

6. Yuki H., Kasagi J., Lipson A.G., et al. Anomalous enhancement of DD reaction in Pd and Au/Pd/PdO heterostructure targets under low-energy deuteron bombardment. *JETP Lett.* 1998. 68. 785.

7. Lipson A.G., Rousetskiy A.S., Karabut A.B., Miley G.H. Increased DD-reaction and the generation of X-rays in the low-current pulsed glow discharge in deuterium with Ti cathode at voltages 0,8–2,45 kW. *Zh* (2005) 127, 6, p. 1334–1349. *JETP* (2005) 100, 1175.

8. Bosch H.S., Halle G.M. Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities. *Nucl. Fusion*. 1994. 32. 611.

9. Chernov I.P., Rusetsky A.S., Krasnov D.N., et al. (2011) *Yadernye reaktsii v sistemakh Pd/PdO:D_x i Ti/TiO₂:D_x pri ikh vozbuzhdenii ioniziruyushchim izlucheniem* [Nuclear reactions in systems Pd/PdO:D_x and Ti/TiO₂:D_x excited by ionizing radiation]. *Zh* (2011), 139, 6, p. 1088–1097. *JETP*, vol. 112, 6, pp. 952–960.

10. Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetsky A.S. (2013) *Issledovanie reaktsiy nizkoenergeticheskogo vzaimodeystviya puchkov ionov i sinkhrotronnogo izlucheniya s vodorodosoderzhashchimi nanosistemami na unikal'nykh ustanovkakh Fian S-60, GELIS i PAVIKOM* [The study of interaction of low-energy reactions and ion beams of synchrotron radiation with hydrogen-nanosystems at unique installations FIAN C-60, and GELIS PAVIKOM]. *Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy* [Innovation and Expertise: scientific works], no. 1 (10), pp. 34–39.

11. Lipson A.G., Chernov I.P., Rusetsky A.S., et al. (2009) *Desorbtsiya «goryachikh» atomov deyteriya iz geterostruktury Pd/PdO:D_x pri vozbuzhdenii ee vodorodnoy podsystemy* [Desorption «hot» atoms of deuterium heterostructure Pd/PdO:D_x when excited by hydrogen subsystem]. *DAN [DAN]*, vol. 425, pp. 621–625.

12. Oginov A.V., Tchaikovsky S.A., Bogachenko V.A., Shpak K.V. (2010) *Rentgenovskoe i ul'trafiol'tovoe izluchenie faz razryada dlinnoy iskry. Nauchnaya sessiya MIFI-2010, Sbornik nauchnykh trudov* [X-ray and ultraviolet radiation phase long spark discharge. Scientific session of the MiFi 2010. Collection of scientific works]. Moscow, vol. II, pp. 92–95.

13. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetsky A.S., Chubenko A.P. (2012) *Issledovanie vykhodov DD-reaktsiy iz geterostruktury Pd/PdO:D_x pri nizkikh energiyakh na ustanovke GELIS. Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Research outputs DD-reaction of the heterostructure Pd/PdO:D_x at low energies by installing GELIS. Brief Communications in Physics LPI], no. 9, pp. 3–12.

14. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetsky A.S., Chubenko A.P. (2012) *Issledovanie vykhodov DD-reaktsiy iz geterostruktury Ti/TiO₂:D_x pri nizkikh energiyakh na ustanovke GELIS. Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Research outputs DD-reaction of the heterostructure Ti/TiO₂:D_x at low energies by installing GELIS. Brief Communications in Physics LPI], no. 12, pp. 3–10.

15. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., et al. (2013) *Issledovanie stimulirovaniya vykhodov DD-reaktsiy iz geterostruktury Pd/PdO:D_x puchkami ionov N⁺ i Ne⁺ na ustanovke GELIS. Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Study to stimulate output DD-reaction of the heterostructure Pd/PdO:D_x beams of H⁺ and Ne⁺ to install GELIS. Brief Communications in Physics LPI], no. 10, pp. 15–18.

16. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., et al. (2013) *Stimulirovanie vykhodov DD-reaktsiy iz geterostrukturny Ti/TiO₂:D_x puchkami ionov N⁺ i Ne⁺ na ustanovke GELIS. Kratkie soobshcheniya po fizike Fizicheskogo instituta im. P.N. Lebedeva Rossiyskoy Akademii Nauk* [Stimulation outputs DD-reaction of the heterostructure Ti/TiO₂:D_x beams of H⁺ and Ne⁺ to install GELIS. Brief Communications in Physics Institute P.N. Lebedev of the Russian Academy of Sciences], no. 11, pp. 3–8.
17. Agafonov A.V., Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Oginov A.V., Rusetskiy A.S., Ryabov V.A., Shpakov K.V. Observation of Neutron Bursts Produced by Laboratory High-voltage Atmospheric Discharge. *Physical Review Letters*. 2013, т. 111, № 11, с. 115003.
18. Agafonov A.V., Oginov A.V., Shpakov K.V. Prebreakdown Phase in Atmospheric Discharges, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2012, vol. 9, no. 4–5, pp. 380–383.