

УДК 539.1

РЕГИСТРАЦИЯ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ $D+D$ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ АЛМАЗНОЙ МИШЕНИ НА ИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ГЕЛИС

М. А. Негодаев¹, М. А. Кирсанов², С. А. Мовчун¹, А. Ф. Попович^{1,4},
А. С. Русецкий¹, В. А. Рябов¹, К. В. Шпаков¹, В. И. Цехош¹,
В. Н. Амосов³, К. К. Артемьев³, С. А. Мещанинов³, Д. А. Скопинцев³

Приведены экспериментальные данные по выходу продуктов $d+d$ ядерной реакции для мишени из поликристаллического алмаза, полученные в исследованиях на ионном ускорителе ГЕЛИС. Описаны используемые в исследованиях на установке оборудование и детекторы для регистрации нейтронов и заряженных частиц. Показана возможность использования УНУ ГЕЛИС для проверки рабочих характеристик полупроводниковых детекторов, предназначенных для регистрации альфа-частиц в исследованиях бор-протонзахватной реакции на комплексе протонной терапии “Прометеус”.

Ключевые слова: ядерные реакции, кристаллические структуры, каналирование ионов, сцинтилляционные детекторы нейтронов, алмазный детектор заряженных частиц, бор-протон захватная терапия.

Введение. В экспериментах с дейтерированными кристаллическими структурами на уникальной научной установке (УНУ) ионный ускоритель ГЕЛИС ФИАН [1] была обнаружена анизотропия в выходе нейтронов из реакции $d + d \rightarrow n + {}^3\text{He}$. Поток нейтронов вдоль направления пучка ионов оказался выше потока нейтронов, исходящих из кристаллической мишени в направлении поперек пучка. Наиболее ярко анизотропия в

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: negodaevma@lebedev.ru.

² НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

³ Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом” “Проектный центр ИТЭР”, 123182 Россия, Москва, пл. ак. Курчатова 1, стр. 3.

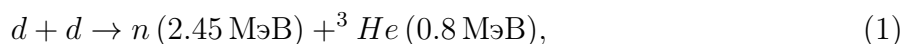
⁴ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 141190 Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. ак. Введенского, 1.

выходе нейтронов проявилась, когда в качестве кристаллической мишени использовалась мишень из текстурированного поликристаллического CVD-алмаза. Перед облучением образец CVD-алмаза насыщался дейтерием путем электролиза. В работе [2] было проведено исследование выхода нейтронов из образцов CVD-алмаза в зависимости от угла между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени, которое показало, что ориентация образца по отношению к пучку дейтронов оказывает влияние на величину выхода нейтронов. Авторы предположили, что наблюдаемый ими ориентационный эффект вызван каналированием ионов дейтерия в текстурированной кристаллической структуре CVD-алмаза. Это предположение получило подтверждение в результате моделирования прохождения пучка ионов дейтерия в алмазе под разными углами, которое дало удовлетворительное согласие с результатами эксперимента [3]. Аналогичные измерения были проведены с мишенью Pd/PdO:Dx, здесь также замечен ориентационный эффект и анизотропия в выходе нейтронов вдоль и поперек направления пучка ионов [4].

Анизотропию в выходе нейтронов из кристаллических структур можно было бы объяснить каналированием быстрых нейтронов, которые рождаются в каналах кристаллической мишени в результате ядерных $d+d$ реакций, однако это предположение требует экспериментального подтверждения.

Кристаллические структуры из CVD-алмаза могут использоваться при создании нейтронных генераторов [5]. Применение мишени-конвертера из текстурированного алмаза на установке ГЕЛИС позволит получить поток моноэнергетических нейтронов для использования их в работе с другими мишенями.

Исследование выхода продуктов ядерных реакций



из кристаллических структур в работе с пучком ионов дейтерия при энергиях меньше 50 кэВ является одной из задач, решаемых в настоящее время на УНУ ГЕЛИС. Результаты исследования выхода продуктов ядерной $d + d$ реакции (как нейтронов, так и заряженных частиц) для мишени из поликристаллического алмаза представлены в этой работе.

Позиционирование мишеней на УНУ ГЕЛИС. Исследуемая мишень-конвертер из CVD-алмаза, облучаемая пучком ионов дейтерия, крепится в вакуумной камере на

охлаждаемом водой поворотном держателе (рис. 1), который позволяет осуществлять измерение мощности, выделяемой в мишени, с помощью калориметрической ячейки.

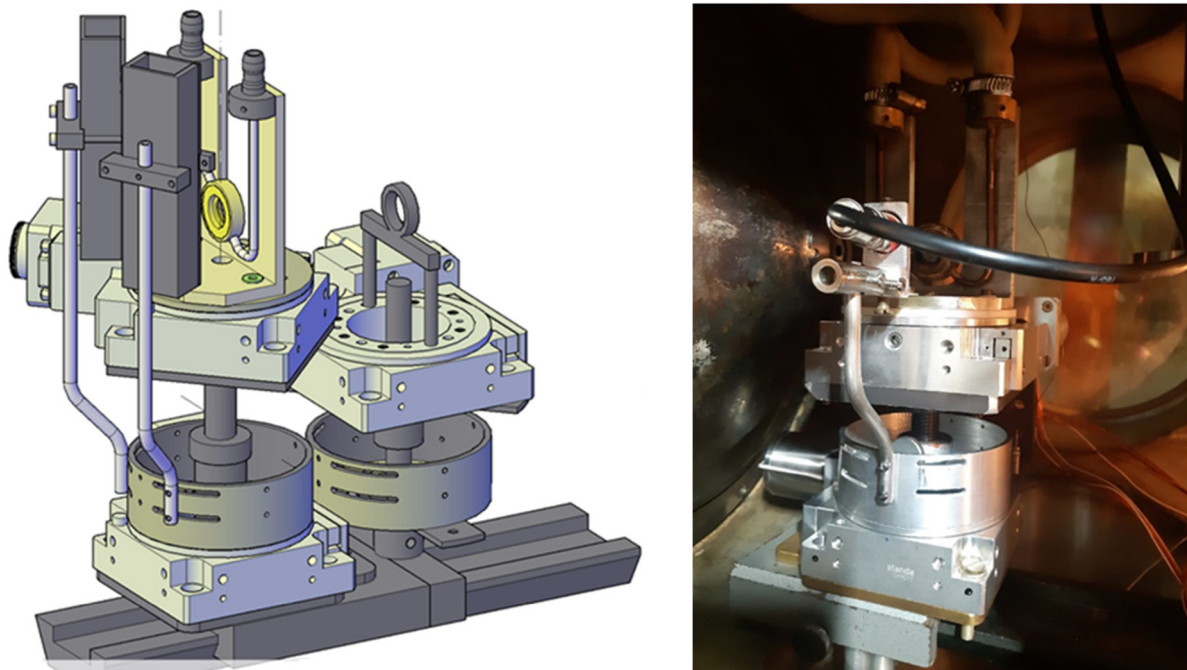


Рис. 1: Поворотный охлаждаемый водой держатель мишеней и система позиционирования детекторов. (а) 3D модель; (б) фото собранной конструкции, установленной в вакуумной камере УНУ ГЕЛИС.

Калибровка и проведенные тесты калориметрической ячейки держателя мишени показали ее работоспособность в диапазоне подводимой мощности 0.25–58 Вт. Погрешность измерений составляет не более 12%. Применение двух расходомеров позволяет варьировать расход воды через ячейку в широком диапазоне, что обеспечивает эффективное охлаждение ячейки во всём рабочем диапазоне мощностей. При этом нагрев воды в ячейке не превышает 5.5 °С. При тестировании и калибровке калориметрической ячейки держателя мишени в качестве нагревателя был использован толстоплёночный чип-резистор в корпусе, припаянный к медной подложке, которая была установлена на место мишени в калориметрической ячейке держателя мишени. Для улучшения теплового контакта между ячейкой и подложкой с нагревателем использовалась термопаста. Нагрев резистора осуществлялся блоком питания постоянного тока (0–30В, 0–3А). Перед измерением охлаждаемый водой держатель мишеней был установлен в вакуумную камеру УНУ ГЕЛИС, которая откачивалась до давления $\sim 10^{-6}$ Торр. Мощность, вы-

деляемая на резисторе, рассчитывалась как произведение силы тока и напряжения, а отводимая водой мощность рассчитывалась по формуле:

$$P = Q \cdot C \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}), \quad (3)$$

где Q – расход воды, C – теплоёмкость воды, T_{in} и T_{out} – температура воды на входе и выходе из ячейки.

Температура воды на входе и выходе калориметрической ячейки регистрировалась термопарами, подключёнными к измерителю – ОВЕН ТРМ 200. Расход воды через калориметрическую ячейку контролировался двумя устройствами – импульсным расходомером с датчиком Холла совместно со счётчиком импульсов СИ8 и стеклянным ротаметром с регулятором расхода воды. Счётчик импульсов во время измерения непрерывно регистрирует расход воды. Измеряемые величины расхода и температуры воды на входе и выходе калориметрической ячейки поступают и записываются в память компьютера.

Изменение тепловой мощности на мишени из текстурированного поликристаллического алмаза при работе с пучком ионов дейтерия приведено на рис. 2.

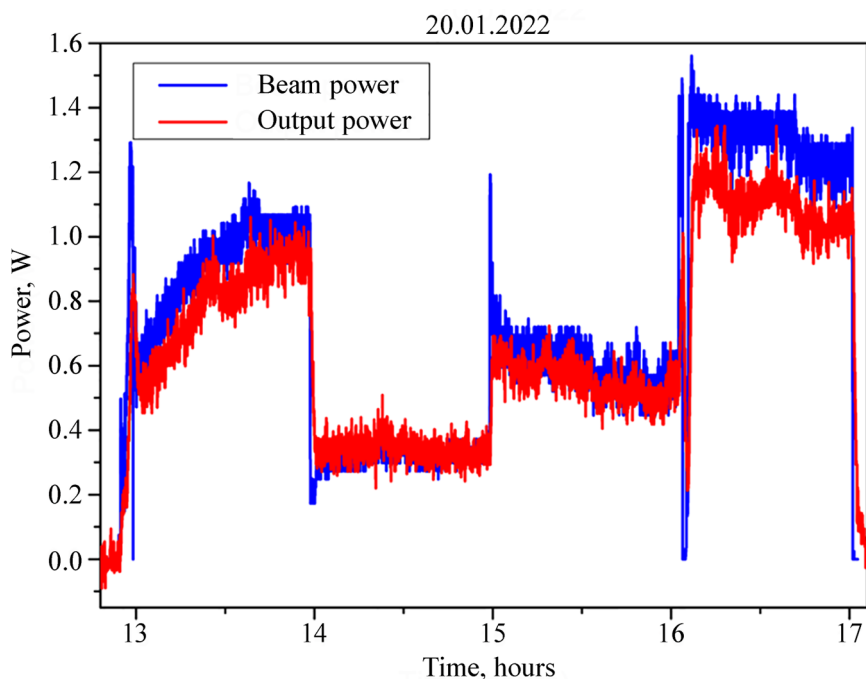


Рис. 2: Изменение тепловой мощности, выделяемой на мишени из текстурированного поликристаллического алмаза при работе с пучком ионов дейтерия.

За держателем с алмазной мишенью-конвертером может располагаться вторая мишень из текстурированного поликристаллического алмаза. Каждая из мишеней находится на отдельном поворотном устройстве. Схема эксперимента представлена на рис. 3.

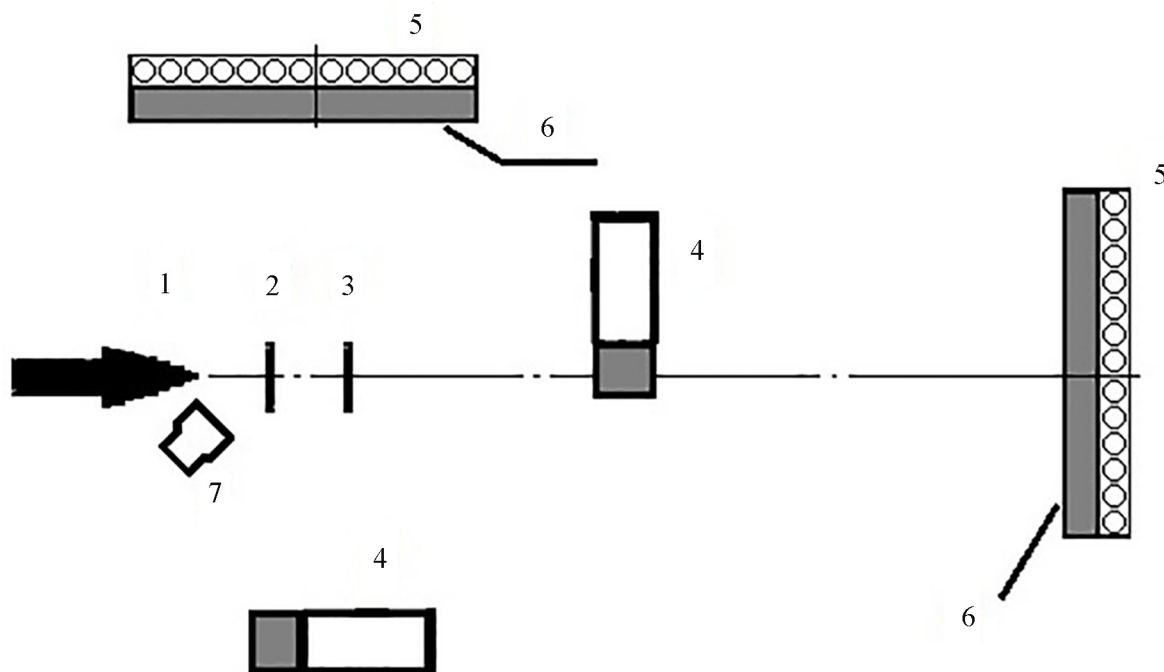


Рис. 3: Схема эксперимента: 1 – пучок, 2 – мишень из CVD-алмаза, 3 – мишень из CVD-алмаза, 4 – сцинтилляционный детектор, 5 – пропорциональные газовые счетчики, наполненные газом ^3He , 6 – оргстекло, 7 – алмазный детектор.

Детектирование продуктов $d+d$ ядерных реакций. На ускорительной установке ГЕЛИС регистрация продуктов $d+d$ ядерных реакций осуществляется детекторами нейтронов и заряженных частиц. Для регистрации нейтронов используются газовые пропорциональные детекторы, наполненные газом ^3He , а также сцинтилляционные детекторы быстрых нейтронов с органическими сцинтилляторами.

Гелиевые газовые детекторы работают в режиме счётчика и определяют количество зарегистрированных нейтронов. На установке ГЕЛИС используются два модуля гелиевых детекторов, каждый из которых состоит из 12 счётчиков и замедлителя из оргстекла. Первый модуль находится напротив мишени перпендикулярно пучку ионов дейтерия, а второй – вдоль пучка в торцевой части корпуса ускорителя ГЕЛИС (рис. 3). Система регистрации нейтронов с помощью ^3He счетчиков описана в [6].

На УНУ ГЕЛИС для регистрации быстрых нейтронов использовались два сцинтилляционных детектора с органическими кристаллами из паратерфенила. Один из этих детекторов был размещен за пределами вакуумной камеры и установлен параллельно оси пучка на расстоянии от мишени ~ 30 см. Второй детектор находился в трубе, которая позволила установить его в вакуумной камере на оси пучка позади второй мишени на расстоянии 15 см от первой мишени.

В сцинтилляционных детекторах для разделения сигналов от нейтронов и гамма-квантов используется метод цифровой идентификации по форме импульсов. Сигналы от детекторов поступают на аналоговые входы дигитайзера CAENDT5730 (8 channels, 14 bit, 500 MS/s). Оцифрованные осциллограммы сигналов с выхода CAENDT5730 записываются в файл данных. Полученный массив данных обрабатывается по специальному алгоритму, который позволяет идентифицировать сигналы от нейтронов и гамма-квантов [7, 8]. Калибровка сцинтилляционных детекторов с органическими сцинтилляторами проводится с использованием гамма источников. Поэтому в энергетических спектрах таких детекторов в качестве единицы энергии используется единица кэВ э. э., означающая кэВ в электронном эквиваленте. При регистрации быстрых нейтронов органическим сцинтилляционным детектором в сцинтилляторе образуются протоны отдачи, энергия которых преобразуется в выходной сигнал детектора. На рис. 4 показан спектр протонов отдачи, измеренный сцинтилляционным детектором на установке ГЕЛИС при регистрации нейтронов от $d+d$ реакции в мишени из поликристаллического алмаза.

В эксперименте на УНУ ГЕЛИС в исследованиях выхода продуктов $d + d$ ядерных реакций для регистрации заряженных частиц впервые использовался алмазный спектрометр, который разработан в организации “Проектный центр ИТЭР” [9]. В состав алмазного спектрометра входит: алмазный детектор, зарядочувствительный предусилитель, усилитель-формирователь, АЦП и персональный компьютер с программным обеспечением, которое позволяет в процессе набора данных в режиме мониторинга наблюдать спектр регистрируемых частиц. Для калибровки алмазного спектрометра использовались альфа-источники (^{226}Ra , ^{241}Am) и источники конверсионных электронов (^{137}Cs , ^{207}Bi).

Алмазный детектор был размещен в вакуумной камере и установлен в держатель системы позиционирования детектора, которая позволяет фиксировать расстояние между детектором и мишенью и поворачивать детектор в вакууме вокруг оси мишени. Алмазный спектрометр регистрировал заряженные продукты $d + d$ ядерных реакций (p , T ,

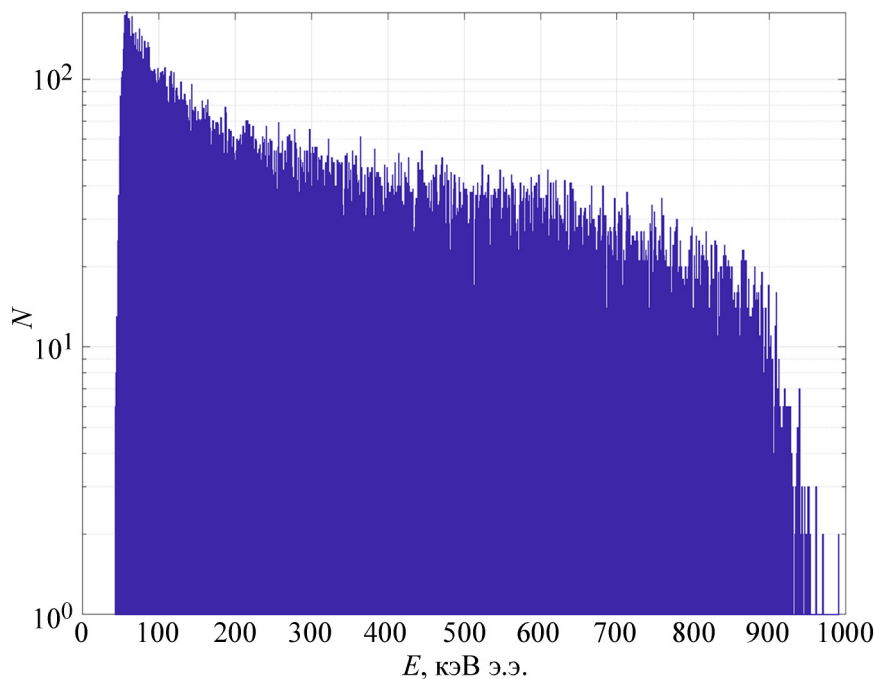


Рис. 4: Спектр протонов отдачи, измеренный сцинтилляционным детектором при регистрации нейтронов от $d+d$ реакции в мишени из поликристаллического алмаза.

^3He), возникающие в CVD-алмазной мишени. На рис. 5 представлен спектр заряженных частиц, зарегистрированных алмазным детектором при работе с поликристаллической алмазной мишенью.

Таким образом, установленный на УНУ ГЕЛИС комплекс из нескольких детекторов нейтронов и алмазного детектора позволяют регистрировать все продукты $d+d$ ядерных реакций при работе с разными мишенями. При этом модули гелиевых счётчиков позволяют получать относительные значения выхода нейтронов, а сцинтилляционные детекторы и алмазный спектрометр дают абсолютные величины выхода нейтронов и заряженных частиц соответственно.

Скорость протекания $d+d$ ядерных реакций при работе с недейтерированной мишенью зависит от насыщения мишени дейтерием, которое происходит при воздействии пучка на мишень. Поэтому в экспериментах с пучком ионов дейтерия на ускорителе ГЕЛИС на первом этапе осуществляется имплантация дейтерия в мишень. При этом ведётся контроль выхода продуктов $d+d$ ядерных реакций. На втором этапе после выхода скорости $d+d$ реакций на насыщение проводятся измерения параметров, характеризующих протекание $d+d$ реакций в различных мишенях. Одним из основных таких

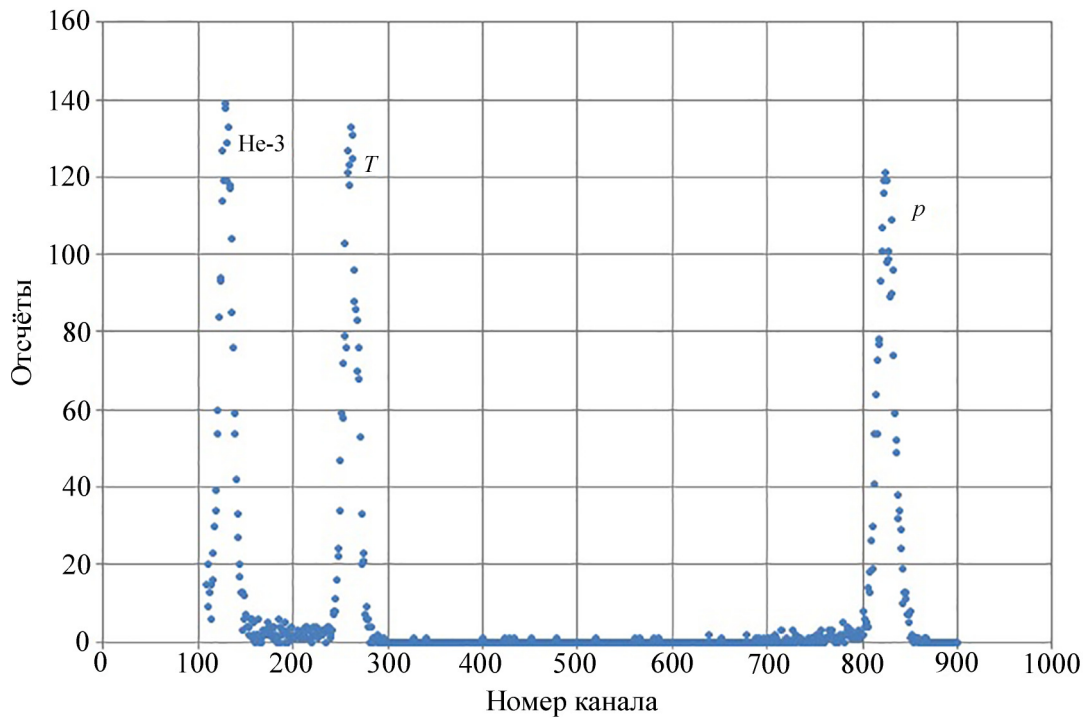


Рис. 5: Амплитудный спектр, измеренный алмазным детектором при регистрации заряженных частиц от $d+d$ реакции в мишени из поликристаллического CVD-алмаза.

параметров является выход вторичных частиц из мишени. Выход Y вторичных частиц определённого сорта – это число вылетающих из мишени в полный телесный угол частиц данного сорта, приходящихся на один ион дейтерия, падающий на мишень. На рис. 6 представлена зависимость выхода продуктов $d+d$ ядерной реакции от энергии налетающих ионов дейтерия при использовании поликристаллической алмазной мишени. Энергия ионов дейтерия в пучке ускорителя ГЕЛИС варьировалась от 15 кэВ до 35 кэВ.

Тестирование детекторов альфа-частиц. В ходе экспериментов по изучению $d+d$ ядерной реакции в кристаллических структурах показано, что алмазный спектрометр является эффективным инструментом для регистрации частиц, возникающих в ядерных реакциях при взаимодействии дейтронов с различными мишенями. При этом высокая чувствительность алмазного спектрометра делает возможным обнаружение редких событий (~ 1 в секунду). Одновременная регистрация ${}^3\text{He}$ (0.8 МэВ), T (1.01 МэВ), p (3.03 МэВ) в экспериментах на УНУ ГЕЛИС позволяет проводить тестирование и проверять линейность полупроводниковых спектрометров заряженных частиц, в частности для регистрации альфа-частиц.

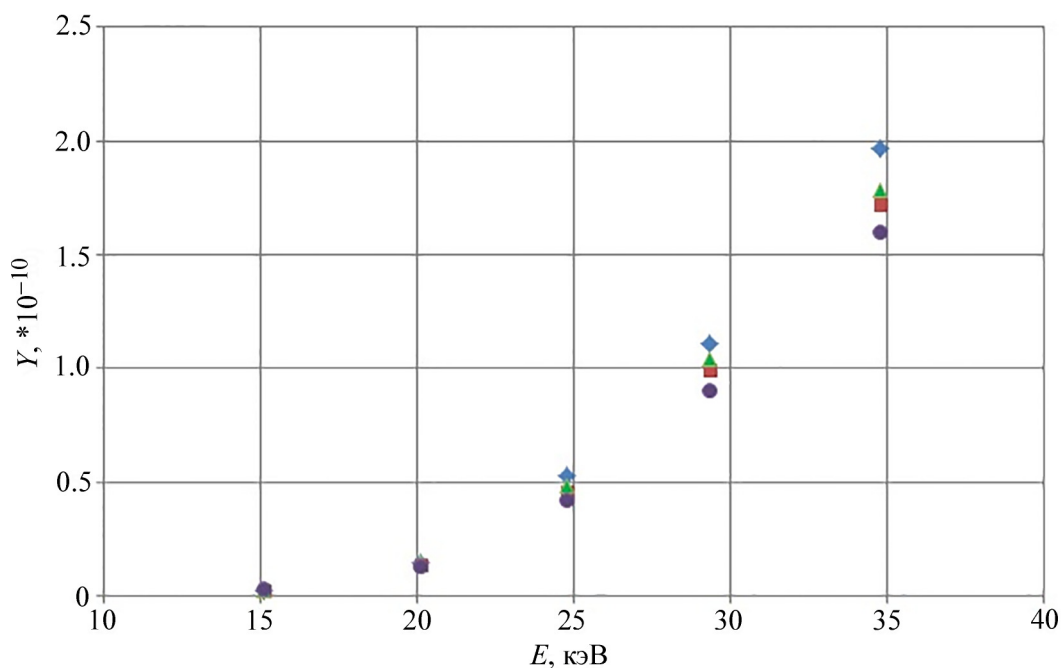


Рис. 6: Выход вторичных частиц, образующихся в $d+d$ реакции в мишени из поликристаллического алмаза, в зависимости от энергии ионов дейтерия. Обозначения точек: ромбы – протоны, квадраты – ионы трития, треугольники – ионы ^3He , кружки – нейтроны.

Детекторы для регистрации альфа-частиц с энергией ~ 1 МэВ в настоящее время могут быть востребованы для протонной и нейтронозахватной терапии с использованием наночастиц бора в качестве радиосенсибилизаторов. В исследованиях, связанных с развитием протонной терапии онкологических заболеваний, такой подход представлен идеей бор-протонзахватной терапии, основанной на реакции бор-протонного синтеза [10]. В результате такой реакции на очень короткий промежуток времени образуется составное ядро $^{12}\text{C}^*$, которое находится в возбужденном состоянии и распадается на альфа-частицу и ион бериллия ^8Be , который затем распадается на две альфа-частицы. Данный процесс является экзотермическим, высвобождается полная энергия 8.7 МэВ в виде передаваемой альфа-частицам кинетической энергии. Для запуска такой реакции, в предположении, что атом бора находится в состоянии покоя, требуется достаточно малая энергия протона. При низких энергиях (0.1–5 МэВ) эффективное сечение реакции становится значительно больше, тем самым сильно повышая продуцирование альфа-частиц вокруг области пика Брэгга (особый интерес представляет резонанс при 675 кэВ: он имеет наибольшее эффективное сечение захвата – 1.4 барн [11]). Это обсто-

ятельство является одним из преимуществ потенциального применения бор-протонной реакции в протонной терапии.

В рамках проекта ФНТП по нейтронным и синхротронным исследованиям предусмотрено оснащение комплекса протонной терапии “Прометеус” детектором альфа-частиц. В качестве такого детектора предложено использовать как кремниевый, так и алмазный спектрометр, рабочие характеристики которого были проверены в исследованиях ядерных реакций на УНУ ионный ускоритель ГЕЛИС ФИАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2021-1347.

Авторы выражают благодарность А. С. Кубанкину за предоставленное для работ на УНУ ГЕЛИС оборудование, А. В. Огинову за техническое содействие, И. Н. Завестовской, М. М. Меркину и И. А. Кудряшову за обсуждение по проблемам использования полупроводниковых детекторов на протонных терапевтических ускорителях.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. А. Негодаев, А. В. Багуля, Препринт ФИАН № 11 (М., ФИАН, 1996).
- [2] A. V. Bagulya, O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **355**, 340 (2015).
- [3] A.V. Bagulya, O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **402**, 243 (2017).
- [4] O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, A. S. Rusetskii, et al., Phys. Rev. Accel. Beams **22**, 034201 – Published 12 March 2019.
- [5] O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, A. S. Rusetskii, et al., Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **14**, 220 (2020).
- [6] О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев, А. С. Русецкий и др., Приборы и техника эксперимента № 1, 24 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220010127.
- [7] M. A. Kirsanov, S. G. Klimanov, I. V. Nazarov, et al., J. Phys.: Conf. Series **1690**, 012057 (2020).
- [8] M. A. Kirsanov, S. G. Klimanov, and A. S. Chepurnov, J. Phys.: Conf. Series **1690**, 012061 (2020).
- [9] К. К. Артемьев, В. Н. Амосов, Н.Б. Родионов и др., Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы” 27.09-01.10 2021 г. Сочи, стр. 179-181.

- [10] P. Bla'ha1, Ch. Feoli, St. Agoste, et al., Front. Oncol. **11**, (2021).| <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.682647>.
- [11] M. H. Sikora and Weller HRA. J. Fusion Energ **35**, 538 (2016). DOI: 10.1007/s10894-016-0069-y.

Поступила в редакцию 4 марта 2022 г.
После доработки 14 марта 2022 г.
Принята к публикации 16 марта 2022 г.