

УДК 539.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ И ПРОТОНОВ DD-РЕАКЦИИ ИЗ Ti И CVD-АЛМАЗА ОТ УГЛА ПОВОРОТА МИШЕНИ

© 2023 г. М. А. Негодаев<sup>а</sup>, А. С. Русецкий<sup>а, \*</sup>, К. В. Шпаков<sup>а</sup>, А. Ф. Попович<sup>а</sup>, В. И. Цехош<sup>а</sup>, В. Н. Амосов<sup>б</sup>, Н. Б. Родионов<sup>б</sup>, К. К. Артемьев<sup>б</sup>, С. А. Мещанинов<sup>б</sup>, Д. А. Скопинцев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Частное учреждение “ИТЭР-Центр”, Москва, 123182 Россия

\*e-mail: ruseckijas@lebedev.ru

Поступила в редакцию 26.06.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 15.08.2022 г.

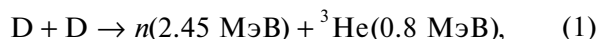
На ионном ускорителе ГЕЛИС исследована зависимость выхода продуктов ядерной DD-реакции (нейтронов и протонов) от угла поворота мишеней из Ti и CVD-алмаза относительно оси пучка ионов  $D^+$  с энергиями  $E \leq 35$  кэВ. Детектирование нейтронов проводили двумя независимыми методами: пропорциональными счетчиками, наполненных  $^3\text{He}$ , и сцинтилляционным детектором с кристаллом стибьена. Детектирование протонов выполнено с помощью алмазного детектора. Детекторы располагали сбоку и позади мишени. Мишень CVD-алмаза имела поликристаллическую структуру и текстуру с ориентацией зерен (100). Кристаллическая структура титановой мишени была однородна и изотропна. Измерения показали зависимость потока нейтронов, зарегистрированного детекторами, от ориентации мишени из текстурированного CVD-алмаза в пучке ионов дейтерия с энергиями 25 и 30 кэВ. Выход протонов из мишени CVD-алмаза показал зависимость от угла поворота мишени при энергии ионов дейтерия 25 кэВ. Для мишени из Ti подобные эффекты не были обнаружены. Ориентационная зависимость выхода нейтронов и протонов из текстурированного алмаза объясняется эффектом каналирования ионов дейтерия в его структуре.

**Ключевые слова:** выход DD-реакции, взаимодействие нейтронов с веществом, ускоритель ионов, детектор нейтронов, CVD-алмаз.

DOI: 10.31857/S1028096023020073, EDN: DSKWEQ

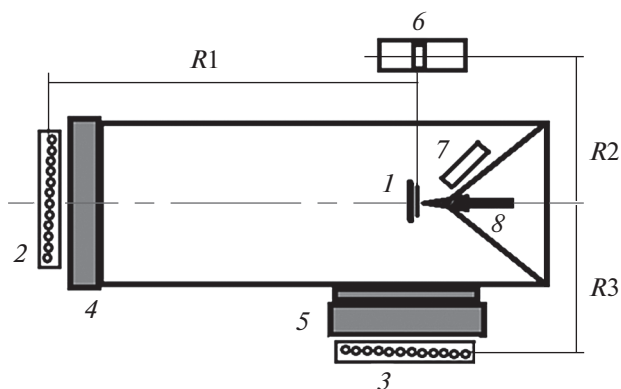
### ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие пучка ионов дейтерия с неподвижными мишенями, обогащенными дейтерием, были исследованы в [1–14] на ионном ускорителе ГЕЛИС [15], который позволяет создавать пучок ионов с небольшими (<1%) угловыми и энергетическими разбросами. Например, в работе [6] исследован выход нейтронов в DD-реакции:



при облучении поликристаллической текстурированной мишени из CVD-алмаза (алмаза, полученного методом химического осаждения из газовой фазы) [16] пучком ионов  $D^+$  с энергией около 20 кэВ. Мишень была предварительно насыщена дейтерием путем электролиза. В [6] была обнаружена зависимость выхода нейтронов (продуктов DD-реакций) от ориентации мишени из дейтерированного поликристаллического CVD-алмаза относительно пучка ионов дейтерия. Авторы предположили, что наблюдаемое увеличение выхода нейтронов в направлении пучка ионов свя-

зано как с эффектами экранирования, так и с каналированием ионов дейтерия в направлениях, задаваемых структурой мишени. Экспериментальные данные по усилению выхода нейтронов из CVD-алмаза были подтверждены модельными расчетами [7], которые проводили с использованием компьютерного кода ВСМ 2.0 [17, 18]. Моделирование показало, что плотность потока ионов внутри кристалла периодически достигает максимума – это так называемый эффект увеличения плотности потока ионов [19]. Также в результате моделирования было выявлено, что для параллельного пучка ионов  $D^+$  в результате их каналирования выход DD-реакции возрастает в 2.2 раза вследствие эффекта увеличения плотности потока ионов внутри кристалла. В работе [20] исследовано прохождение нейтронов от источника  $^{252}\text{Cf}$  через текстурированный CVD-алмаз. Измерения показали зависимость потока нейтронов, падающих на детектор, от ориентации мишени. Возможное объяснение эффекта – каналирование нейтронов в текстурированном CVD-алмазе.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 – мишень на держателе, охлаждаемом водой; 2 и 3 – нейтронные детекторы на основе  $^{12}\text{C}$ -счетчиков, 4 и 5 – радиаторы из оргстекла толщиной 7 и 10 см соответственно; 6 – сцинтилляционный детектор нейтронов; 7 – алмазный детектор заряженных частиц; 8 – ионный пучок. Расстояния от мишени до детекторов  $R_1 = 100$ ,  $R_2 = 45$ ,  $R_3 = 40$  см.

В настоящей работе продолжены исследования по выяснению роли каналирования ионов в протекании DD-реакции в кристаллических структурах с использованием различных детекторов для регистрации продуктов DD-реакции.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерения выхода нейтронов реакции ядерного синтеза (1) при низких энергиях ионов ( $E \leq 35$  кэВ) в дейтерированных кристаллических структурах на ионном пучке установки ГЕЛИС были использованы детекторы нейтронов на основе газовых счетчиков СНМ-18, заполненных  $^3\text{He}$  (далее  $^3\text{He}$ -счетчики) и радиаторами из оргстекла (2 группы по 12 счетчиков в каждой), и сцинтилляционный детектор с кристаллом стильбена (диаметром 4 см, высотой 4 см). Радиаторы из оргстекла имели толщину 7 и 10 см для групп  $^3\text{He}$ -счетчиков, расположенных на расстоянии 100 и 45 см от мишени соответственно. Калибровка детектора на основе  $^3\text{He}$ -счетчиков была проведена с использованием источника нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , детектор с кристаллом стильбена тестировали на нейтронном DD-генераторе. Детектор нейтронов на основе стильбена имеет систему разделения сигналов от нейтронов и от  $\gamma$ -квантов по форме импульса.

Для регистрации заряженных частиц использовали алмазный детектор с диаметром входного окна 3 мм, расположенный в 4.5 см от мишени. Перед проведением экспериментов выполняли процедуру калибровки энергетической шкалы измерительного тракта алмазного спектрометра. Для калибровки использовали источники  $\alpha$ -ча-

стиц ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), набор источников ОСИКЭ ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{207}\text{Bi}$ ) и прецизионный генератор импульсов. Результаты калибровки представлены в [21]. Поскольку разные детекторы калибровали в различных условиях, то их показания можно сравнивать только качественно.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. В качестве мишеней использовали Ti и CVD-алмаз. В отличие от работы [6], мишени предварительно не дейтерировали. Мишени располагали на поворотном держателе, представляющем собой калориметрическую ячейку, охлаждаемую непрерывным потоком воды. Расход воды и ее температуру на входе и выходе держателя мишени непрерывно записывали. В каждой серии измерений на ускорителе выставляли определенное ускоряющее напряжение, энергия пучка  $E$  определяется значением ускоряющего напряжения источника питания фирмы Spellman и источником питания разряда ионного источника, который определяет разброс ионов по энергии  $\Delta E < 300$  эВ, ток пучка непрерывно контролировали. Время одного измерения составляло 20 мин. Диаметр пучка на мишени при угле поворота мишени  $\beta = 0^\circ$  (мишень перпендикулярна пучку) равнялся 6 мм. Выделяемая пучком мощность на мишени в период проведения исследований не превышала 10 Вт. Измерение мощности пучка, выделяемой на мишени, позволило оценить температуру мишеней для каждого измерения. В результате расчетов в программе ANSYS [22] с учетом используемой в эксперименте конструкции и конструктивных материалов калориметрической ячейки, в которую устанавливали мишени, было показано, что температура алмазной мишени при изменении мощности пучка от 5 до 10 Вт меняется от 30 до 38°C, а температура мишени из Ti – от 98 до 173°C.

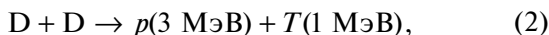
Выход нейтронов DD-реакции (1) определяли по формуле  $Y_{\text{DD}} = n_n / (I_D S)$ , где  $n_n$  – поток нейтронов от мишени в  $4\pi$  ср,  $I_D$  – средний ток ионов  $\text{D}^+$  (в ион/с),  $S$  – площадь мишени под пучком,  $\beta$  – угол падения пучка на мишень. Для удобства расчетов и сравнения при  $\beta = 0^\circ$  было принято  $S = 1$ . Поток нейтронов от мишени в  $4\pi$  ср определяли по формуле  $n_n = (n_{\text{fg}} - n_{\text{bg}}) / \epsilon_n$ , где  $n_{\text{fg}}$  и  $n_{\text{bg}}$  – средний счет нейтронного детектора в рабочем и фоновом сеансе соответственно,  $\epsilon_n$  – эффективность нейтронного детектора.

Выход протонов за один сеанс определяли по формуле  $Y_p = N_p / (I_D \epsilon_p S)$ , где  $N_p$  – число событий под протонным пиком,  $t$  – время измерения,  $\epsilon_p$  – эффективность алмазного детектора,  $S$  – площадь мишени под пучком. Для удобства расчетов, как и ранее, при  $\beta = 0^\circ$  было принято  $S = 1$ . Измерения показали, что фоновый счет протонов равен нулю.

Выход нейтронов по сцинтилляционному детектору определяли с учетом его эффективности регистрации DD-нейтронов по процедуре аналогичной детектору с  $^3\text{He}$ -счетчиком.

Расположение детекторов позволяло измерять выход нейтронов в направлениях вдоль пучка и поперек пучка и сравнивать их.

Детектирование протонов DD-реакции:



осуществляли с помощью алмазного детектора, расположенного на поворотном устройстве на расстоянии 4.5 см от мишени, под углом  $45^\circ$  к направлению пучка ионов.

Измерение при каждом выбранном ускоряющем напряжении и угле поворота мишени началось спустя некоторое время (в зависимости от энергии пучка) после включения пучка, по достижении равномерного насыщения поверхности мишени дейтерием. Тогда счет детекторов стабилизировался и зависел только от тока пучка. Измерения выделяемой мощности и расчеты температуры мишени позволяют предполагать, что концентрация дейтерия в поверхностном слое мишени при определенной энергии ионов после достижения насыщения менялась незначительно и эти изменения не оказывали большого влияния на изменения выхода продуктов DD-реакции.

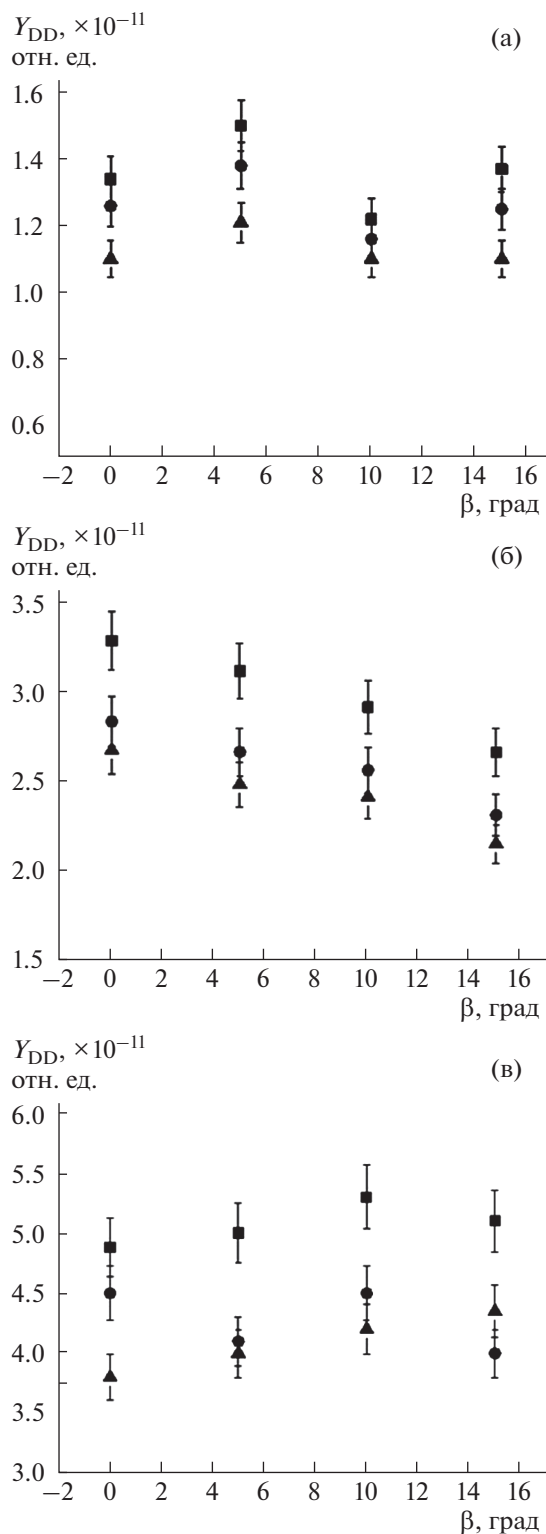
## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки влияния каналирования ионов дейтерия на протекание DD-реакции были проведены измерения зависимости выхода DD-нейтронов из мишеней Ti и CVD-алмаза от угла поворота мишени.

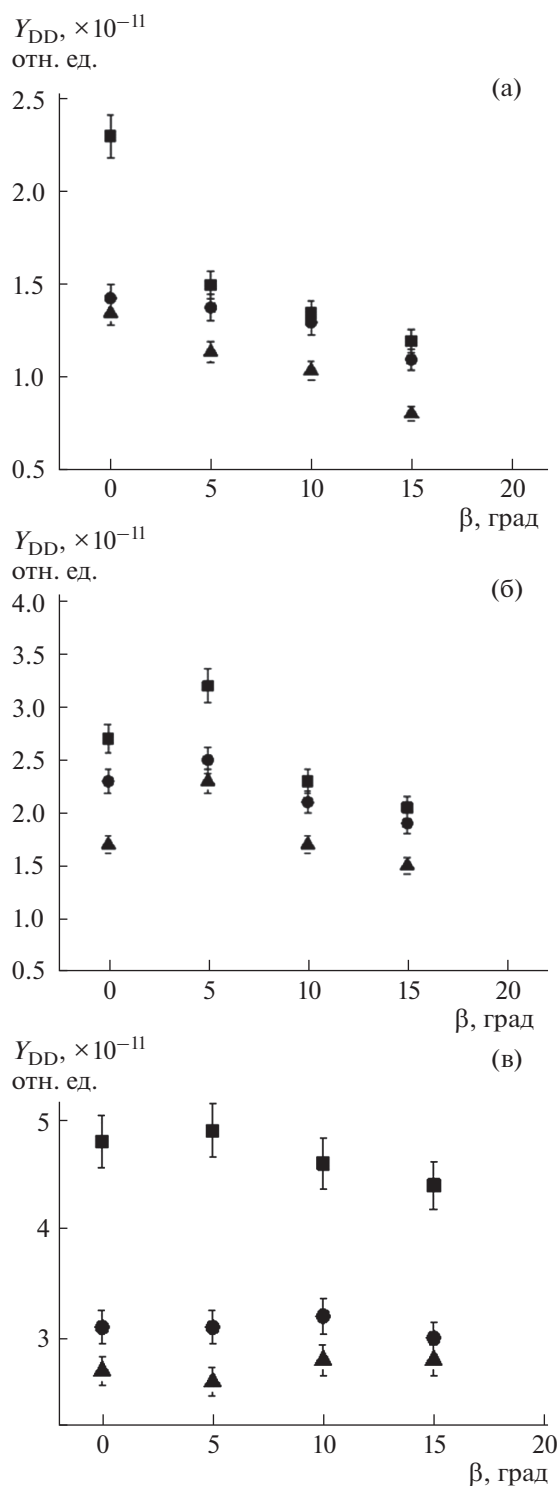
На рис. 2 приведены зависимости выхода нейтронов от угла поворота Ti мишени при энергии ионов 25, 30 и 35 кэВ. Для титановой мишени выход нейтронов почти не зависит от угла поворота мишени.

На рис. 3 приведены зависимости выхода нейтронов от угла поворота мишени CVD-алмаза при энергии ионов 25, 30 и 35 кэВ. При энергии 25 кэВ (рис. 3а) зависимость выхода нейтронов от угла поворота мишени сильная. Это можно объяснить каналированием ионов дейтерия в текстурованной мишени. Также обнаружена анизотропия выхода нейтронов вдоль и поперек направления пучка (особенно при нормальном падении пучка). Возможно, это объясняется каналированием нейтронов – продуктов DD-реакции – в CVD-алмазе. При энергии ионов пучка 30 кэВ (рис. 3б) эта зависимость от угла менее выражена.

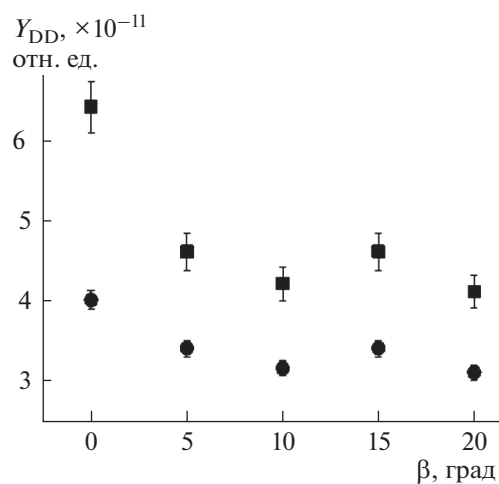
С ростом энергии дейтронов до 35 кэВ зависимость выхода нейтронов от угла  $\beta$  в диапазоне  $0^\circ$ –



**Рис. 2.** Зависимость выхода DD-нейтронов от угла поворота мишени из Ti, измеренная с помощью детектора на основе  $^3\text{He}$ -счетчиков вдоль направления пучка (■) и перпендикулярно направлению пучка (●) и с помощью сцинтилляционного детектора перпендикулярно пучку (▲). Энергия и ток пучка составляли 25 кэВ, 210 мкА (а); 30 кэВ, 220 мкА (б); 35 кэВ, 280 мкА (в). Угол  $\beta = 0^\circ$  соответствует положению мишени перпендикулярно направлению пучка дейтронов.



**Рис. 3.** Зависимость выхода DD-нейтронов от угла поворота мишени из CVD-алмаза, измеренная с помощью детектора на основе  $^3\text{He}$ -счетчиков вдоль направления пучка (■) и перпендикулярно направлению пучка (●) и с помощью сцинтилляционного детектора перпендикулярно пучку (▲). Энергия и ток пучка составляли 25 кэВ, 60 мкА(а); 30 кэВ, 70 мкА (б); 35 кэВ, 100 мкА (в). Угол  $\beta = 0^\circ$  соответствует положению мишени перпендикулярно направлению пучка дейтронов.



**Рис. 4.** Зависимость выхода нейтронов и протонов DD-реакции от угла поворота мишени CVD-алмаза, измеренная с помощью сцинтилляционного детектора перпендикулярно пучку (■) и с помощью алмазного детектора в направлении, противоположном пучку (●). Энергия и ток пучка составляли 25 кэВ и 20 мкА соответственно. Угол  $\beta = 0^\circ$  соответствует положению мишени перпендикулярно направлению пучка дейтронов.

$15^\circ$  пропала, но анизотропия выхода нейтронов вдоль и поперек направления пучка от угла поворота мишени сохранилась (рис. 3в).

На рис. 4 показаны зависимости выхода нейтронов и протонов, измеренных сцинтилляционным и алмазным детекторами соответственно, от угла поворота мишени CVD-алмаза при энергии ионов 25 кэВ и токе пучка 20 мкА. Видна четкая зависимость выхода продуктов DD-реакции от угла поворота мишени.

Такие эффекты анизотропии выхода нейтронов и его зависимость от угла поворота мишени в случае поликристаллического текстурированного CVD-алмаза можно объяснить его структурой. Структура CVD-алмаза существенно неоднородна и анизотропна. На рис. 5 приведены изображение поверхности скола CVD-алмаза в электронном микроскопе QUANTA 650 FEG (рис. 5а) и изображение ростовой поверхности образца CVD-алмаза, полученное с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse L200N (рис. 5б). Кристаллиты CVD-алмаза растут в виде колонн, ориентированных перпендикулярно поверхности алмазной пленки, причем с увеличением толщины пленки поперечный размер колонн увеличивается. Размер кристаллитов возрастает от  $\sim 1$  мкм в сильно дефектном слое вблизи подложки до десятков и до сотен мкм на противоположной, более совершенной, ростовой стороне (которая обращена к пучку). Кроме того, на ростовой поверхности все кристаллы имеют четкую текстуру с ориентацией

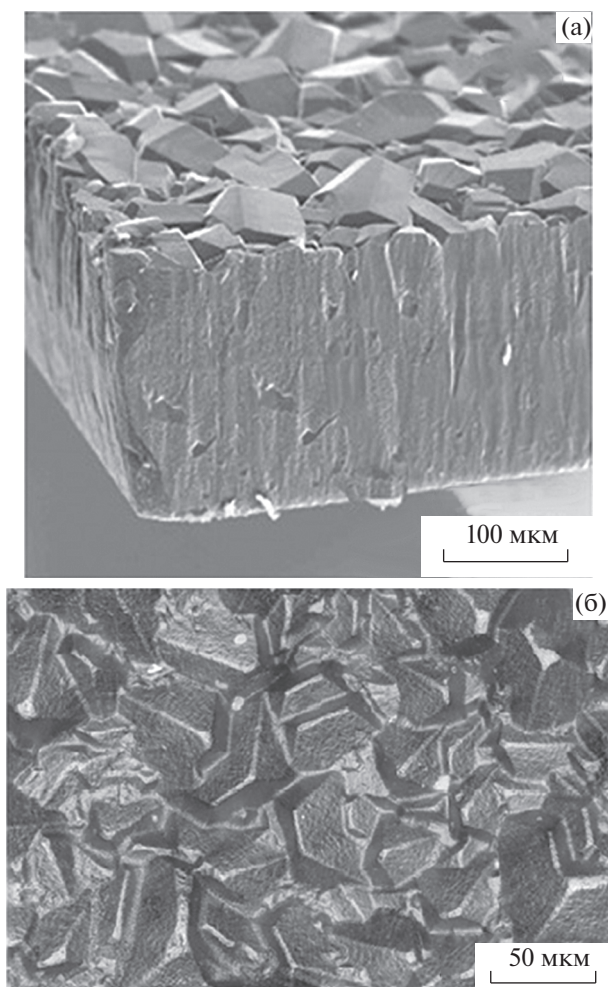


Рис. 5. Изображение поверхности скола (а) и ростовой поверхности (б) образца CVD-алмаза.

зерен (100). Часть ионов дейтерия при нормальном падении, попадая в каналы на мишени (в границах зерен и в самих зернах), имеют пробеги значительно больше, чем при других углах. Это приводит к большей вероятности протекания DD-реакции и большему выходу нейтронов. Таким образом, при повороте мишени выход нейтронов постепенно падает. Кроме того, сами нейтроны могут попадать в многочисленные каналы CVD-алмаза и, многократно рассеиваясь, двигаются в направлении, задаваемом структурой мишени (преимущественный выход вдоль пучка дейтронов). Это может объяснить анизотропию выхода нейтронов вдоль и поперек направления пучка. С ростом энергии дейтронов характер зависимости выхода нейтронов от угла поворота мишени становится менее выраженным, что, возможно, связано с постепенной деградацией (распылением и аморфизацией) поверхности CVD-алмаза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения выхода продуктов DD-реакции, проведенных независимыми методами —  $^3\text{He}$ -счетчиками и сцинтилляционным детектором — показали зависимость попавшего на детектор потока нейтронов от ориентации мишени из текстурированного CVD-алмаза в пучке ионов дейтерия. Для изотропных образцов Ti подобные эффекты не наблюдали. Возможное объяснение эффекта — это каналирование ионов дейтерия и нейтронов в каналах текстурированного CVD-алмаза.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.В. Огинову и С.А. Мовчуну за помощь в проведении экспериментов и О.Д. Далькарову за полезные обсуждения проблем, затронутых в статье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A. et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2012. V. 39. P. 247. <https://www.doi.org/10.3103/S1068335612090011>
2. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A. et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2012. V. 39. P. 325. <https://www.doi.org/10.3103/S1068335612120019>
3. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A. et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2013. V. 40. P. 282. <https://www.doi.org/10.3103/S1068335613100023>
4. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A. et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2013. V. 40. P. 305. <https://www.doi.org/10.3103/S1068335613110018>
5. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S., Chubenko A.P. // Phys. Scr. 2015. V. 90. P. 074051. <https://www.doi.org/10.1088/0031-8949/90/7/074051>
6. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2015. V. 355. P. 340. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.01.021>
7. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Pivovarov Yu.L., Rusetskii A.S., Tukhfatullin T.A. // Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. B. 2017. V. 402. P. 243. <https://www.doi.org/10.1016/J.NIMB.2017.02.059>
8. Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S. // Phys. Particles Nuclei. 2017. V. 48. № 5. P. 691. <https://www.doi.org/10.1134/S1063779617050045>
9. Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S., Chubenko A.P., Pivovarov Yu. L., Tukhfatullin T.A. // Phy. Rev. Accelerators and Beam. 2019. V. 22. P. 034201. <https://www.doi.org/10.1103/PHYSREVACCELBEAMS.22.034201>
10. Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S. et al. // J. Phys.: Conf. Series. 2019. V. 1390. P. 012002. <https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/1390/1/012002>
11. Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S. et al. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 2. P. 220. <https://www.doi.org/10.1134/S102745102002024X>

12. *Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S. et al.* // JINST. 2020. V. 15. P. C06062. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/C06062>
13. *Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2017. V. 402. P. 243. <https://www.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.02.059>
14. *Negodaev M.A., Kirsanov M.A., Popovich A.F. et al.* // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2022. V. 49. № 4. P. 110. <https://www.doi.org/10.3103/S1068335622040030>
15. *Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S. et al.* // Instrum. Experimental Tech. 2020. V. 63. № 1. P. 19. <https://www.doi.org/10.1134/S002044122001011X>
16. *Ralchenko V.G., Pleuler E., Lu F.X., Sovyk D.N., Bolshakov A.P., Guo S.B., Tang W.Z., Gontar I.V., Khomich A.A., Zavedeev E.V., Konov V.I.* // Diam. Relat. Mater. 2012. V. 23. P. 172. <https://www.doi.org/10.1016/j.diamond.2011.12.031>
17. *Abdrashitov S.V., Bogdanov O.V., Korotchenko K.B. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2017. V. 402. P. 106. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.132>
18. *Korotchenko K.B., Tukhfatullin T.A., Pivovarov Y.L., Eikhorn Yu.L.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 732. P. 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/732/1/012031>
19. *Korotchenko K.B., Tukhfatullin T.A., Pivovarov Y.L., Eikhorn Yu.L.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 732. P. 012031. 1 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/732/1/01203>
20. *Dalkarov O.D., Glushkov N.A., Negodaev M.A., Rusetsky A.S., Oginov A.V., Kirsanov M.A., Popovich A.F.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 2. P. 226. <https://www.doi.org/10.1134/S1027451020020251>
21. *Артемьев К.К., Амосов В.Н., Родионов Н.Б. и др.* // Сборник тезисов XIX Всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы”, 27 сентября—1 октября 2021 г., Сочи. С. 179.
22. ANSYS Engineering Simulation Software (2022) ANSYS, Inc. <https://www.ansys.com/> Cited 20 June 2022.

## Investigation of the Dependence of the Yield of Neutrons and Protons of the DD Reaction from Ti and CVD Diamond on the Target Rotation Angle

M. A. Negodaev<sup>1</sup>, A. S. Rusetskii<sup>1, \*</sup>, K. V. Shpakov<sup>1</sup>, A. F. Popovich<sup>1</sup>, V. I. Tsekhosh<sup>1</sup>, V. N. Amosov<sup>2</sup>, N. B. Rodionov<sup>2</sup>, K. K. Artemev<sup>2</sup>, S. A. Meshaninov<sup>2</sup>, D. A. Skopintsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Insitution “Project Center ITER”, Private Institution of the State Atomic Energy Corporation Rosatom, Moscow, 123182 Russia*

*\*e-mail: ruseckijas@lebedev.ru*

At the HELIS ion accelerator, the dependence of the yield of nuclear DD reaction products (neutrons and protons) on the angle of rotation of a Ti and CVD diamond target relative to the axis of the D<sup>+</sup> ion beam at energies  $E \leq 35$  keV was studied. Neutron detection was carried out by two independent methods: proportional counters filled with <sup>3</sup>He and a scintillation detector with a stilbene crystal. Protons were detected using a diamond detector. The detectors were located on the side and behind the target. The CVD diamond target had a polycrystalline structure and texture with (100) grain orientation. The crystal structure of the titanium target was homogeneous and isotropic. The measurements showed the dependence of the neutron flux recorded by the detectors located on the side and behind the target on the orientation of the target made of textured CVD diamond in the deuterium ion beam at energies of 25 and 30 keV. The proton yield from the CVD diamond target showed a dependence on the target rotation angle at an energy of 25 keV. For the Ti target, no such effects were observed. The orientational dependence in the yield of neutrons and protons from textured diamond is explained by the effect of channeling deuterium ions in its structure.

**Keywords:** yield of DD reaction, interaction of neutrons with matter, ion accelerator, neutron detector, CVD diamond.