

УДК 539.1

## ПРОХОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ТЕКСТУРИРОВАННОГО CVD-АЛМАЗА

© 2020 г. О. Д. Далькаров<sup>а</sup>, Н. А. Глушков<sup>а</sup>, М. А. Негодаев<sup>а</sup>, А. С. Русецкий<sup>а, \*</sup>,  
А. В. Огинов<sup>а</sup>, М. А. Кирсанов<sup>б</sup>, А. Ф. Попович<sup>с</sup>

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

<sup>б</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

<sup>с</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: ruseckijas@lebedev.ru

Поступила в редакцию 16.08.2019 г.

После доработки 02.09.2019 г.

Принята к публикации 30.09.2019 г.

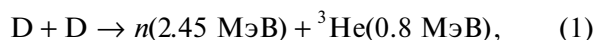
Исследовано прохождение быстрых нейтронов через кристаллическую структуру текстурированного алмаза, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-алмаз). В качестве источников использовали нейтроны с энергией 2.45 МэВ из DD-реакции и изотопа <sup>252</sup>Cf со средней энергией около 2 МэВ. Детектирование нейтронов осуществляли двумя независимыми методами: с помощью пропорциональных счетчиков с наполнением <sup>3</sup>He и сцинтилляционного детектора на основе кристалла паратерфенила. Измерения показали зависимость попавшего на детектор потока нейтронов от ориентации мишени. В случае изотропных образцов, содержащих алмаз и углерод, подобные эффекты не наблюдались. Возможное объяснение эффекта — это каналирование ионов дейтерия и нейтронов в каналах текстурированного синтетического алмаза.

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

**DOI:** 10.31857/S1028096020030085

### ВВЕДЕНИЕ

Ранее [1] был исследован выход нейтронов в реакции:



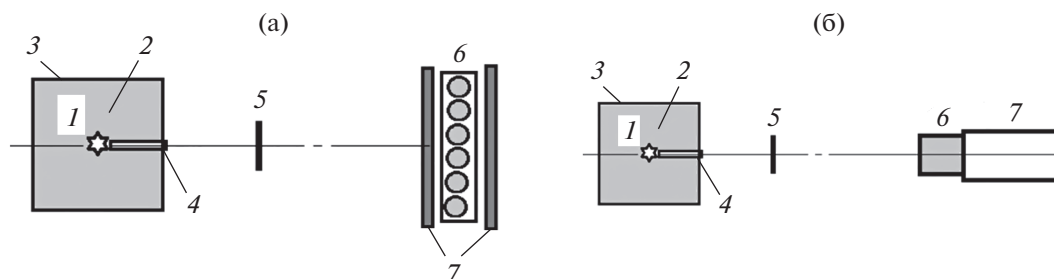
с использованием текстурированной мишени из алмаза, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-алмаз, CVD — Chemical Vapor Deposition) [2], и пучка D<sup>+</sup> с энергией около 20 кэВ из ускорителя ГЕЛИС [3], который обеспечивает пучок с небольшими угловыми и энергетическими разбросами. В [1] была обнаружена зависимость выхода нейтронов (продуктов DD-реакций) от ориентации мишени относительно пучка ионов дейтерия. Авторы предположили, что наблюдаемое увеличение выхода нейтронов связано как с эффектами экранирования, так и с каналированием.

Ориентационный эффект увеличения коэффициента усиления DD-реакции в синтетическом алмазе был исследован методом компьютерного моделирования [4]. Было получено, что в результате эффекта обострения потока, обусловленного каналированием, в 2.2 раза увеличивает-

ся относительный коэффициент усиления в случае параллельного пучка и до 1.2 раза в случае пучка D<sup>+</sup> с угловой расходимостью, равной трем критическим углам каналирования. Получено качественное согласие с экспериментом [1]. Было показано, что величина потока нейтронов зависит не только от ориентации мишени в пучке, но и от направления вылета нейтронов из мишени. Поток нейтронов вдоль направления пучка ионов значительно превосходит поток поперек пучка. Одно из возможных объяснений — это каналирование и фокусировка нейтронов в структуре текстурированного синтетического алмаза. В настоящей работе были проведены измерения с использованием нейтронного источника <sup>252</sup>Cf и мишени из текстурированного синтетического алмаза, аналогичной [1].

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

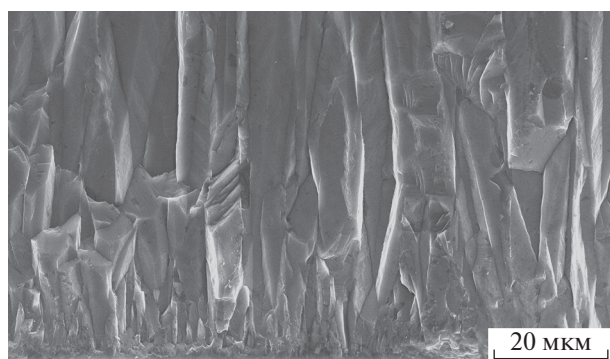
Схемы расположения источника <sup>252</sup>Cf, детектора и мишени показаны на рис. 1. Нейтроны регистрировали как с использованием детектора на основе счетчиков <sup>3</sup>He, так и сцинтилляционного детектора с органическим кристаллом. Источник



**Рис. 1.** Расположение источника  $^{252}\text{Cf}$ , детектора и мишени в схемах измерения: а — детектором на основе счетчиков  $^3\text{He}$ : 1 — источник  $^{252}\text{Cf}$ , 2 — полиэтиленовый контейнер, 3 — кадмий, 4 — канал коллиматора нейтронов, 5 — алмазная мишень, 6 — детектор, 7 — оргстекло; б — сцинтилляционным детектором: 1 — источник  $^{252}\text{Cf}$ , 2 — полиэтиленовый контейнер, 3 — кадмий, 4 — канал коллиматора нейтронов, 5 — алмазная мишень, 6 — сцинтиллятор (паратерфенил), 7 — фотоэлектронный умножитель.

нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  (активность  $10^4 \text{ с}^{-1}$ ) располагался в центре контейнера из полиэтилена с размерами  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ , который был окружен слоем кадмия толщиной 0.5 мм. На лицевой части контейнера имелся канал диаметром 4 мм и длиной 5 см. Детектор на основе счетчиков  $^3\text{He}$  располагался на расстоянии 1 м от источника  $^{252}\text{Cf}$  (рис. 16). Он состоял из шести газоразрядных счетчиков СНМ-18 и был снабжен замедлителем нейтронов из органического стекла (3 см перед детектором и 3 см за детектором). Сцинтилляционный детектор, состоящий из кристалла паратерфенила (диаметром 2.5 и высотой 2.5 см), фотоэлектронного умножителя (Hamamatsu R6094) и аналого-цифрового преобразователя CAENDT5730, позволял разделять сигналы от нейтронов и гамма-квантов по форме импульса [5]. Сцинтилляционный детектор находился на расстоянии 13 см от мишени (рис. 16). Мишень располагалась на поворотном устройстве на расстоянии 10 см от источника  $^{252}\text{Cf}$ .

Методика изготовления мишени из синтетического алмаза подробно описана в [2]. Ее толщи-

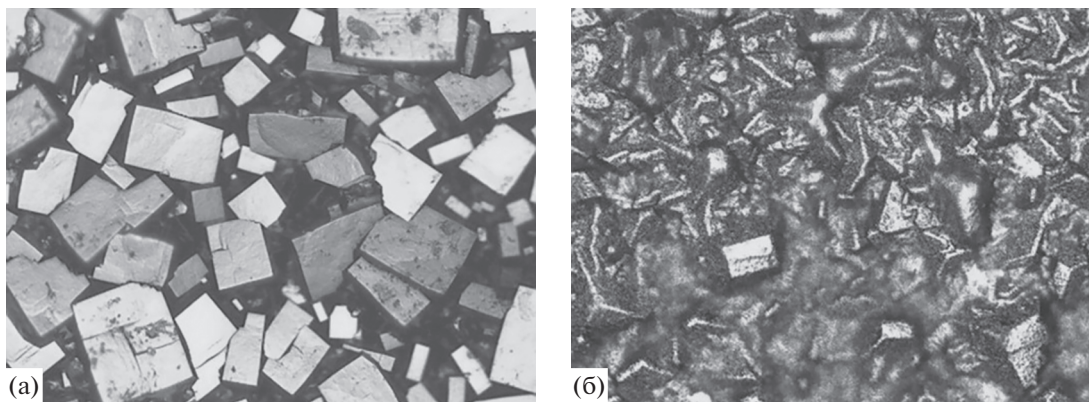


**Рис. 2.** Изображение поликристаллической алмазной пленки в поперечном сечении, полученное в растровом электронном микроскопе.

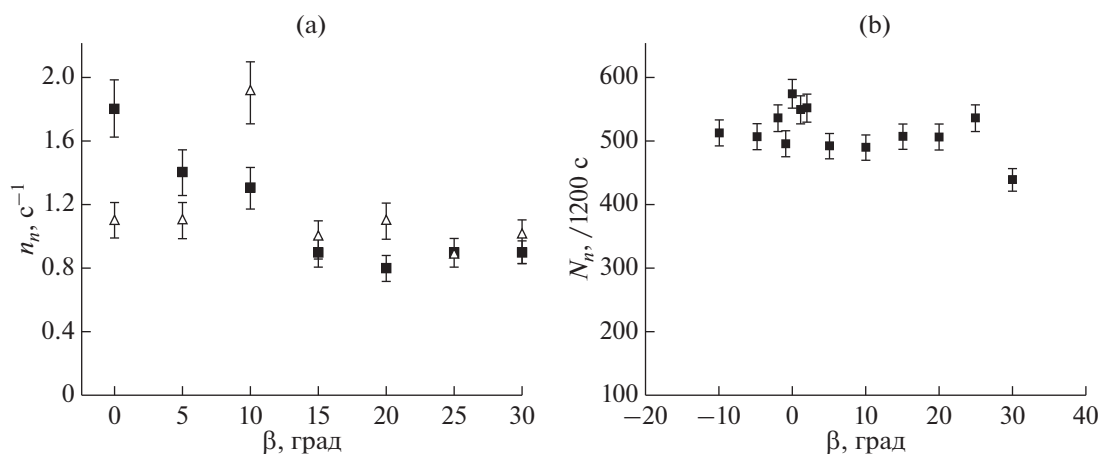
на составляла 400 мкм. Структура алмаза неоднородна и анизотропна, что видно из изображения, полученного в растровом электронном микроскопе JEOL (рис. 2). Кристаллиты растут в виде колонн, ориентированных перпендикулярно поверхности, причем с увеличением толщины пленки “диаметр” колонн увеличивается. Размеры кристаллитов возрастают от  $\sim 1 \text{ мкм}$  в сильно дефектном слое вблизи подложки до десятков и даже сотен микрометров на противоположной ростовой стороне. Кристаллы алмаза имеют текстуру [100]. После облучения мишени пучком ионов дейтерия происходит частичное разрушение кристаллитов и графитизация поверхности на ростовой стороне (рис. 3) на глубине пробега ионов (около 1 мкм).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость счета нейтронного детектора на основе счетчиков  $^3\text{He}$  от угла  $\beta$  поворота мишени алмаза показана на рис. 4а. Видно, что когда мишень повернута ростовой стороной к источнику, то при  $\beta = 0^\circ$  поток нейтронов, зарегистрированный детектором, максимален а при  $\beta = 20^\circ$  он падает почти на 22%. Если мишень повернута подложкой к источнику нейтронов, то максимальный счет детектора зафиксирован при  $\beta = 10^\circ$ . В этом случае поток нейтронов, попавших на детектор, при  $\beta = 20^\circ$  также почти на 22% меньше. Зависимость счета сцинтилляционного нейтронного детектора на основе кристалла паратерфенила от угла  $\beta$  поворота алмазной мишени показана на рис. 4б. В сцинтилляционном детекторе для полного разделения сигналов от нейтронов и гамма-квантов нужно установить энергетический порог. Калибровка детектора проводится с использованием гамма-источников, поэтому в таких детекторах в качестве единицы энергии используется килоэлектронвольт в электронном эк-



**Рис. 3.** Оптические микрофотографии поверхности поликристаллической алмазной пленки до (а) и после (б) облучения мишени пучком ионов дейтерия. Размер изображения  $500 \times 370$  мкм.



**Рис. 4.** Зависимость от угла поворота алмазной мишени  $\beta$  счета нейтронного детектора: а – на основе счетчиков  $^3\text{He}$  (мишень повернута к источнику нейтронов ростовой стороной (■) и стороной подложки (Δ)); б – сцинтилляционного детектора за время 1200 с (мишень повернута ростовой стороной к источнику нейтронов, порог регистрации протонов отдачи 150 кэВ в электронном эквиваленте).

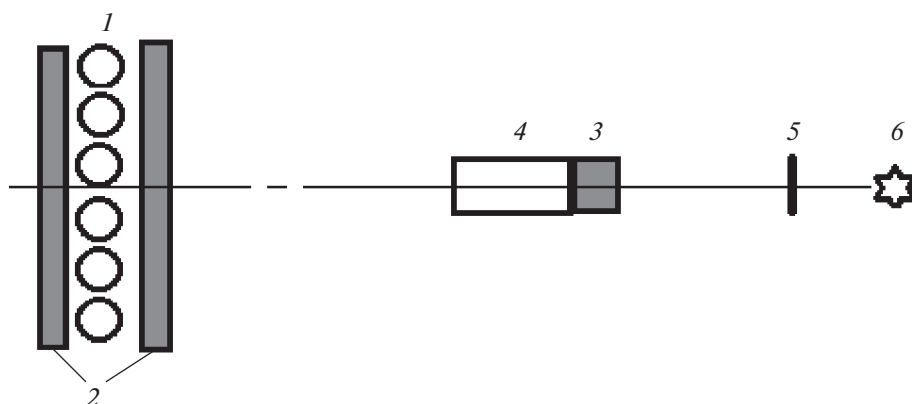
виваленте. В эксперименте порог составлял 150 кэВ в электронном эквиваленте. Из рис. 4б видно, что если мишень повернута ростовой стороной к источнику, то при  $\beta = 0^\circ$  поток нейтронов, зарегистрированный детектором, максимален, а при  $\beta = 30^\circ$  он падает почти на 24%. При погрешности измерений 4% это дает статистически достоверный результат, т.е. поворот алмазной мишени влияет на проходящий через нее поток нейтронов.

Влияние поворота мишени на показания сцинтилляционного детектора нейтронов выражено менее ярко, чем в случае детектора на основе гелиевых счетчиков. Это, возможно, объясняется тем, что сцинтилляционный детектор чувствителен только к быстрым нейтронам (порог регистрации протонов отдачи в нем составлял 150 кэВ в электронном эквиваленте), а детектор на основе гелиевых счетчиков более чувствителен к медленным нейтронам, которые могут быть в

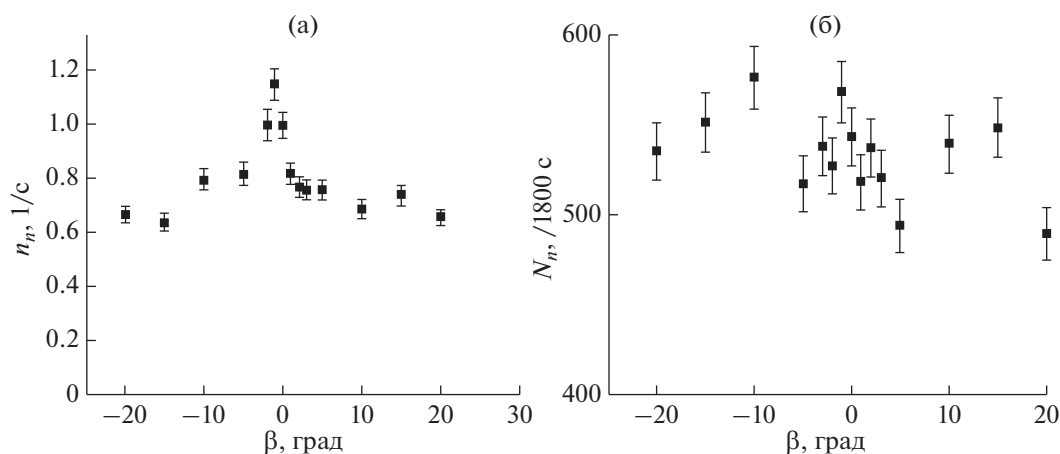
большей степени подвержены каналированию и фокусировке в алмазной мишени.

Для уменьшения влияния рассеянных в полиэтилене нейтронов на результаты эксперимента была проведена вторая серия измерений, когда источник  $^{252}\text{Cf}$  располагался перед мишенью без полиэтиленового контейнера (рис. 5). В качестве мишени был использован текстурированный синтетический алмаз, ранее не подвергавшийся облучению ионами дейтерия. Источник  $^{252}\text{Cf}$ , мишень и детекторы были расположены на одной линии на воздухе. Расстояние от источника до мишени равно 10 см, расстояние от мишени до кристалла сцинтилляционного детектора составляло 20 см, расстояние от источника до детектора  $^3\text{He}$  равно 128 см.

Зависимость счета нейтронного детектора на основе гелиевых счетчиков от угла  $\beta$  поворота мишени для второй серии измерений показана на



**Рис. 5.** Схема расположения источника  $^{252}\text{Cf}$ , детекторов и мишени во второй серии измерений: 1 – детектор на основе счетчиков  $^3\text{He}$ ; 2 – оргстекло; 3 – сцинтиллятор (паратерфенил); 4 – фотоэлектронный умножитель; 5 – алмазная мишень; 6 – источник  $^{252}\text{Cf}$ .



**Рис. 6.** Зависимость от угла поворота алмазной мишени  $\beta$  счета нейтронного детектора: а – на основе счетчиков  $^3\text{He}$  (мишень повернута ростовой стороной к источнику нейтронов); б – сцинтилляционного детектора за время 1800 с (мишень повернута ростовой стороной к источнику нейтронов, порог регистрации протонов отдачи 150 кэВ в электронном эквиваленте).

рис. 6а. Видно, что когда мишень повернута ростовой стороной к источнику, поток нейтронов, зарегистрированный детектором, максимален при  $\beta = 0^\circ$ , а при  $\beta = 20^\circ$  он падает почти в два раза. Влияние поворота мишени на показания сцинтилляционного детектора нейтронов выражено менее ярко, чем в случае детектора на основе счетчиков  $^3\text{He}$  (рис. 6б). Однако в области  $\beta = 0^\circ$  также заметен максимум счета, который затем спадает при повороте мишени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, двумя независимыми методами регистрации нейтронов (использование детектора на основе счетчиков  $^3\text{He}$  и сцинтилляционного детектора) установлено, что ориентация мишени из синтетического алмаза в потоке ней-

тронов оказывает влияние на величину потока, прошедшего через нее в направлении детектора. Это, возможно, объясняется особенностями прохождения нейтронов через текстурированную структуру синтетического алмаза (их каналированием и фокусировкой). Постановка опыта по прохождению нейтронов через алмазную мишень не является идеальной, поскольку высока доля нейтронов, падающих на мишень не параллельно, и это влияет на показания детекторов. В дальнейших экспериментах предусматривается обеспечить более высокий уровень параллельности потока нейтронов, падающих на мишень, и избежать выхода рассеянных нейтронов из полиэтиленового контейнера.

Полученное в работе подтверждение каналирования быстрых нейтронов позволяет объяснить

анизотропию выхода нейтронов из мишеней, которая наблюдалась ранее в [1, 6–10].

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность В.Г. Ральченко за помощь в изготовлении мишеней из синтетического алмаза, Д.Н. Сovyку и Р.А. Хмельницкому за анализ состояния поверхности мишеней.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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>
2. *Ralchenko V.G., Pleuler E., Lu F.X. et al.* // Diam. Relat. Mater. 2012. V. 23. P. 172. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.12.031>
3. *Багуля А.В., Негодаев М.А.* Электрофизическая установка “Гелис”. Препринт ФИАН. 1996. № 11. 44 с.
4. *Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2017. V. 402. P. 243. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.02.059>
5. *Chepurnov A.S., Kirsanov M.A., Klenin A.A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 934. P. 012057. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/934/1/012057>
6. *Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 9. С. 3. (Bull. Lebedev Physics Institute. 2012. V. 39. № 9. P. 247.) <https://doi.org/10.3103/S1068335612090011>
7. *Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев, Русецкий А.С., Чубенко А.П.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 12. С. 3. (Bull. Lebedev Physics Institute. 2012. V. 39. № 12. P. 325.) <https://doi.org/10.3103/S1068335612120019>
8. *Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S., Chubenko A.P.* // Physica Scripta. 2015. V. 90. № 7. P. 074051. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/7/074051>
9. *Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S. et al.* // Phys. Rev. Accelerators Beams. 2019. V. 22. № 3. P. 034201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.034201>
10. *Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S. et al.* // Phys. Particles Nucl. 2017. V. 48. № 5. P. 691. <https://doi.org/10.1134/S1063779617050045>

## The Passage of Fast Neutrons through the Crystal Structure of Textured CVD Diamond

O. D. Dalkarov<sup>1</sup>, N. A. Glushkov<sup>1</sup>, M. A. Negodaev<sup>1</sup>, A. S. Rusetsky<sup>1,\*</sup>, A. V. Oginov<sup>1</sup>,  
M. A. Kirsanov<sup>2</sup>, A. F. Popovich<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

<sup>3</sup>*Prokhorov Institute of General Physics RAS, Moscow, 119991 Russia*

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

The passage of fast neutrons through the crystal structure of a textured diamond obtained by chemical vapor deposition (CVD) was studied. Neutrons with energy of 2.45 MeV from the DD reaction and with average energy of about 2 MeV from the <sup>252</sup>Cf isotope were used as sources. Neutrons were detected by two independent methods: using proportional counters filled with <sup>3</sup>He and a paraterphenyl scintillation detector. The measurement showed the dependence of the neutron flux incident on the detector on the orientation of the target. In the case of isotropic samples containing diamond and carbon, no such effects were observed. A possible explanation of the effect is the channeling of deuterium and neutron ions in the channels of a textured CVD diamond.

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