

Физическая аппаратура и её элементы

УДК 685.5.08

Тестирование алмазного нейтронного детектора на каскадном сильноточном ускорителе КГ–2,5

В. Н. Амосов, Н. Б. Родионов, К. В. Митрофанов, А. С. Егоров,
С. А. Мещанинов, Р. Н. Родионов, В. М. Пиксайкин

Выполнены радиационные испытания алмазного детектора на каскадном сильноточном ускорителе КГ–2,5. При наборе флюенса $2 \cdot 10^{14}$ см⁻² для 14 МэВ-нейтронов было обнаружено ухудшение работы детектора, вследствие эффекта «поляризации». Энергетическое разрешение ухудшилось в 2,3 раза. Скорость счета в пике (n , α)-реакции уменьшилась на 7 %, а положение этого пика сдвинулось на 1 МэВ по отношению к позиции пика необлученного детектора. При этом работоспособность детектора как радиометра нейтронного потока сохранялась. Измерены спектры отклика облученного детектора при повышенных температурах.

PACS: 29.40.-n

Ключевые слова: алмазный нейтронный детектор, ускоритель, радиационная стойкость, испытания детектора, нейтронный флюенс, спектральный отклик.

Введение

Целью данной работы является исследование радиационной стойкости алмазного детектора, предназначенного для работы в составе Вертикальной Нейтронной Камеры (ВНК) установки ИТЭР.

Важнейшими задачами нейтронной диагностики ИТЭР является определение интенсивности нейтронного выхода, управление термоядерным горением, контроль нейтронного флюенса на пер-

вой стенке и измерение нейтронных спектров для определения параметров термоядерной плазмы. ВНК — подсистема нейтронной диагностики ИТЭР, предназначенная для измерения нейтронного выхода в полоидальном сечении плазмы токамака и восстановления профиля нейтронного источника [1].

В условиях работы термоядерного реактора нейтронные детекторы диагностики ВНК должны выдерживать длительные радиационные нагрузки с плотностью потока быстрых нейтронов в местах установки детекторов 10^{10} — 10^{11} н/(см²с), работать в условиях повышенных рабочих температур (до 150 °С), а также обеспечивать возможность технологического прогрева детекторов до 250 °С. Именно детектор на основе синтетического алмаза, обладая радиационной стойкостью ко всем видам излучений, позволит обеспечить измерения спектральных характеристик потоков быстрых нейтронов в таких условиях. При этом важно установить, как меняется способность детектора измерять нейтронные потоки под действием радиационных нагрузок, и оценить влияние повышенных температур на его работу.

В данной работе выполнено облучение алмазного детектора с набором флюенса до $2 \cdot 10^{14}$ см⁻² для 14 МэВ-нейтронов с последующим тестированием радиационно-поврежденного детектора.

Амосов Владимир Николаевич, старший научный сотрудник¹.
Родионов Николай Борисович, ведущий научный сотрудник¹.
Митрофанов Константин Вячеславович, и.о. нач. лаборатории².
Егоров Андрей Сергеевич, научный сотрудник².
Мещанинов Сергей Анатольевич, научный сотрудник¹.
Родионов Роман Николаевич, младший научный сотрудник¹.
Пиксайкин Владимир Михайлович, вед. научный сотрудник².

¹Частное учреждение «ИТЭР-Центр».
Россия, 123182, Москва, пл. академика Курчатова, д. 1, стр. 3.
Тел. 8 (499) 196-91-69. Факс 8 (499) 196-16-34.
E-mail: rodionovnb@gmail.com

²АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».
Россия, 249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1.
Тел. 8 (484) 399-89-61. Факс 8 (484) 396-82-25.
E-mail: kmitrofanov@ipre.ru

Статья поступила в редакцию 6 мая 2015 г.

© Амосов В. Н., Родионов Н. Б., Митрофанов К. В.,
Егоров А. С., Мещанинов С. А., Родионов Р. Н.,
Пиксайкин В. М., 2015

Измерены спектральные отклики детектора при повышенной температуре.

Тестирование детекторов до облучения нейтронами

Предварительное тестирование испытуемого (Д1) и контрольного детекторов (Д2) проводилось на нейтронном генераторе ИНГ-07Т. Оба детектора демонстрировали высокое качество в измерениях нейтронных спектров с энергетическим разрешением не хуже 1—1,5 %. Плотность потока нейтронов в эксперименте на расстоянии 5 см от мишени генератора определялась по показаниям калиброванного радиометра-монитора с Si(Li) детектором и составляла $5,475 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Чувствительность к 15 МэВ-нейтронам детекторов Д1, Д2 составила $1,031 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ и $0,977 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ соответственно.

Облучение детектора

Радиационные испытания алмазного детектора выполнялись на каскадном сильноточном ускорителе КГ-2,5. Детектор облучался 5 часов непрерывно при энергии дейтронов $E_d = 1,5 \text{ МэВ}$ и токе ионов 170 мкА. Для генерации потока нейтронов использовалась реакция ${}^7\text{Li}(d, n)$.

Для измерения энергетического спектра нейтронов из литиевой мишени был использован метод времени пролета, осуществленный на слабо-точном ускорителе ЭГ-1 ГНЦ РФ-ФЭИ, причем с такими же характеристиками по энергиям, как и у сильноточного ускорителя КГ-2,5. Но в отличие от последнего, ЭГ-1 работал в импульсном наносекундном режиме, чтобы обеспечить времяпролетные измерения. Прерывание и последующая группировка ионного пучка производилась на входе в ускоряющую трубку, что позволило получить импульсный ионный пучок на мишени ускорителя с необходимыми временными характеристиками и величиной тока в импульсе $\sim 1 \text{ мА}$. Длительность импульсов тока составляла $\sim 3 \text{ нс}$, период следования 1,8 мкс.

В качестве детекторов нейтронов использовалось литиевое стекло NE-905 толщиной 3 мм и диаметром 50 мм, сопряженное с фотоумножителем ФЭУ-30. В ряде опытов также применялся сцинтилляционный детектор нейтронов с кристаллом стибена диаметром 60 мм и длиной 60 мм. Использование литиевого стекла позволило провести измерение спектров нейтронов в области 0,1—20 МэВ. Обработка аппаратных спектров проводилась с помощью специально разработанных программ, позволяющих преобразовать аппаратные спектры нейтронов в энергетические [2].

Облучаемый объект располагался под углом 0° по отношению к оси ускорителя. Спектр нейтронов реакции ${}^7\text{Li}(d, n)$ в эксперименте под углом 0° показан на рис. 1.

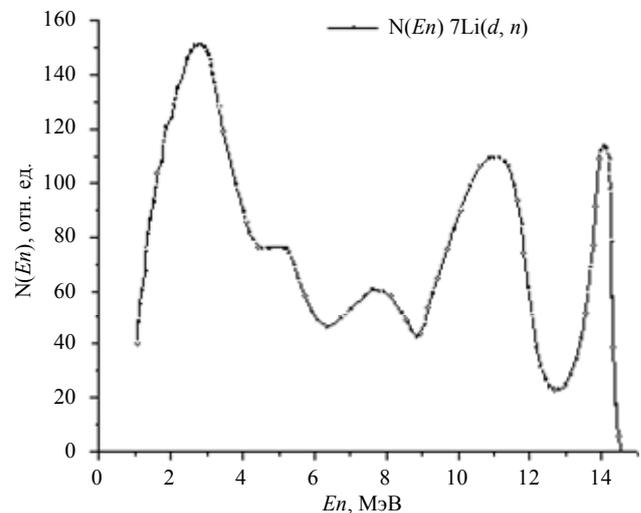


Рис. 1. Спектр нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(d, n)$ под 0°

Контроль флюенса нейтронов в эксперименте выполнялся с помощью активационного метода. Активационный метод измерения спектров нейтронов использует связь между наведенной активностью детекторов-мониторов и плотностью потока (или флюенсом) нейтронов. Два активационных детектора Au и Al были установлены в непосредственной близости от испытуемого детектора. Детекторы облучались в течении 5 часов непрерывно при энергии дейтронов $E_d = 1,5 \text{ МэВ}$ и токе 170 мкА. В качестве спектрометра наведенной гамма-активности использовался HPGe-детектор Canberra GX5019. Методика определения флюенса в эксперименте описана в [3].

В результате анализа спектров активации мониторов было получено значение флюенса нейтронов на испытуемом детекторе, равное $2 \cdot 10^{14}$ нейтронов/см².

Тестирование детектора после облучения

После набора флюенса $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ было обнаружено ухудшение работы детектора, вследствие эффекта «поляризации». Для стабильной работы детектора потребовалось увеличить напряжение смещения детектора с +300 до +400 В. Спектры отклика облученного детектора Д1 в серии 5 последовательных измерений показаны на рис. 2.

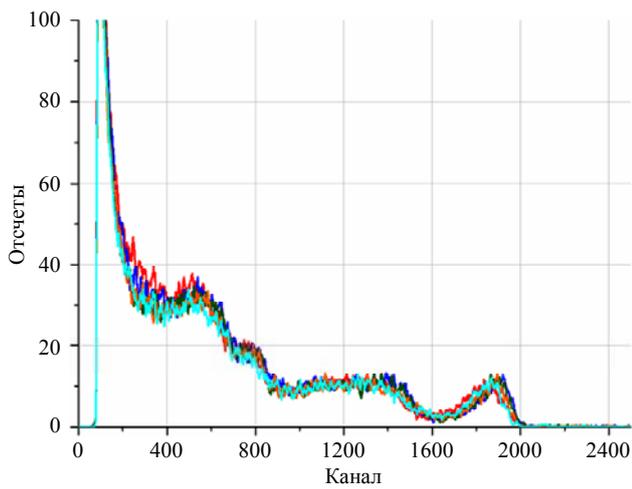


Рис. 2. Спектры отклика детектора Д1 в серии последовательных измерений при напряжении смещения +400 В

Положение пика (n, α)-реакции облученного детектора было сдвинуто на 1 МэВ по отношению позиции этого пика на детекторе перед облучением. Энергетическое разрешение ухудшилось в 2,3 раза. Скорость счета в пике (n, α)-реакции уменьшилась на 7 %. Сравнение спектров отклика до и после облучения детектора Д1 приведено на рис. 3.

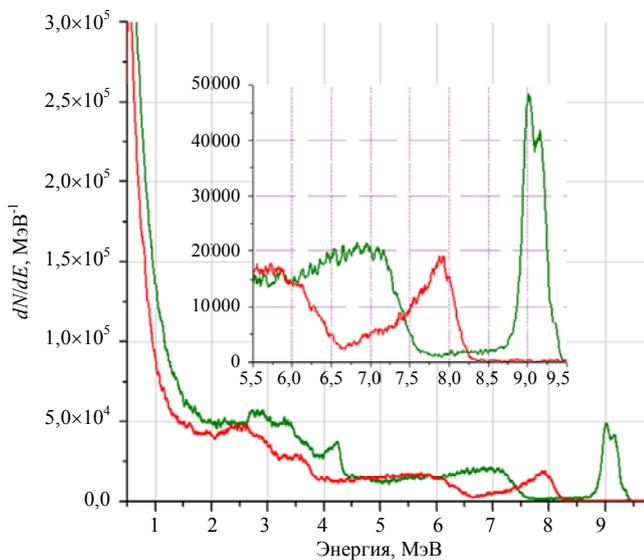


Рис. 3. Сравнение спектров отклика детектора Д1 до и после облучения. На вкладке – увеличенный масштаб.

Таким образом, в эксперименте была продемонстрирована радиационная стойкость испытуемого детектора под быстрыми нейтронами при флюенсе до $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, однако наблюдались радиационное повреждение детектора и ухудшение его спектральных характеристик. В целом при этом

сохранялась работоспособность детектора как радиометра нейтронного потока.

После первичных тестов облученного детектора были выполнены измерения спектров отклика облученного детектора при повышенной температуре. Для этого детектор, помещенный в оправу нагревателя в оснастке на нейтронном генераторе, нагревался, и затем измерялись характеристики его работы. Схема спектрометрического тракта и калибровка шкалы не изменялись. Было выполнено 10 измерений спектра отклика детектора при температуре 280 °С. Спектры отклика фиксировались также и при промежуточных температурах при остывании корпуса детектора. Стабильная работа генератора контролировалась с помощью опорного детектора, показывающего повторяемость параметров поля облучения в серии (см. рис. 4).

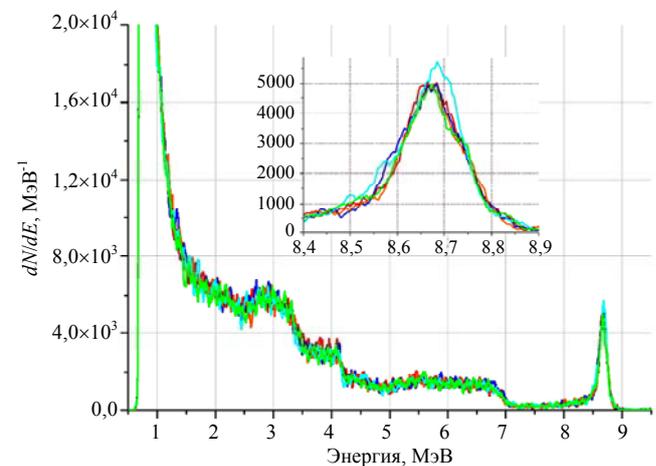


Рис. 4. Сигнал опорного детектора в серии измерений

На рис. 5 представлены спектры отклика детектора Д1 при повышенных температурах. Ожидаемого эффекта улучшения параметров радиационно-поврежденного детектора при повышенной температуре обнаружено не было. Более того, при предельной температуре 280 °С детектор заметно ухудшил работу, амплитуда сигнала уменьшилась на 20 %, энергетическое разрешение детектора ухудшилось. Нагрев детектора до 200 °С практически не влиял на его работу. Выдержка детектора при температуре 280 °С в течение одного часа и последующее охлаждение показали трансформацию спектрального отклика с тенденцией к улучшению спектральных характеристик. На рис. 6 показана серия измерений спектров при охлаждении детектора от 280 °С до комнатной температуры.

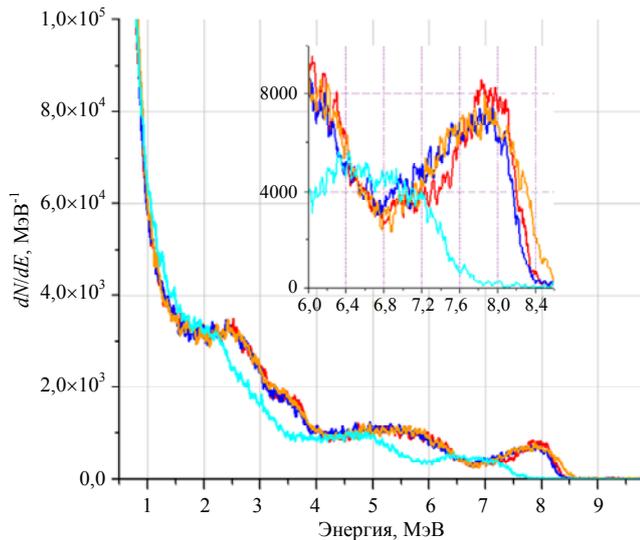


Рис. 5. Спектры отклика детектора под нейтронным потоком в серии измерений при повышенной температуре. Красный, синий — +20 °С, оранжевый — +200 °С, голубой — +280 °С

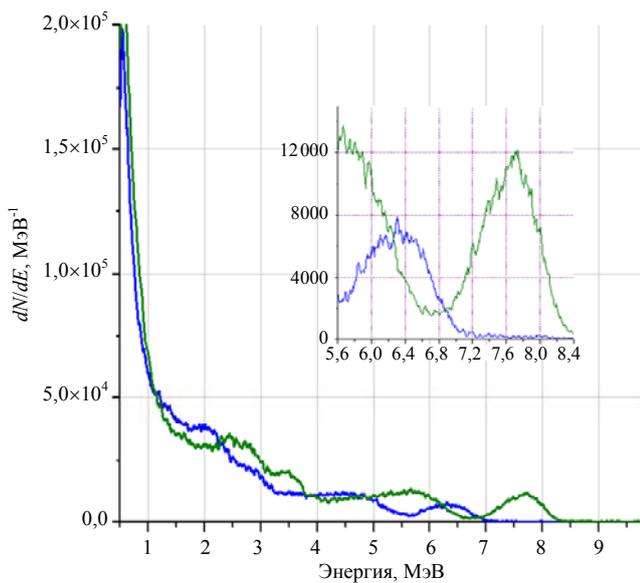


Рис. 6. Серия измерений спектрального отклика детектора EG25 при снижении рабочей температуры детектора. Синяя линия — +280 °С, зеленая линия — +40 °С

Амплитуда отклика детектора восстановилась после охлаждения. Энергетическое разрешение улучшилось по сравнению с тем, что было до нагрева. Данное явление можно объяснить тем, что радиационные дефекты (вакансии) отжигаются при умеренных температурах. В данном эксперименте наблюдался частичный отжиг полученных детектором радиационных повреждений. Нагревание до температуры 200—220 °С не меняет его характеристик, но позволяет отжигать первичные дефекты. Эксперимент показал, что эксплуатация детектора при повышенной температуре по-

зволяет увеличить его радиационный ресурс. Для уточнения скорости отжига дефектов радиационно-поврежденного детектора и предельных флюенсов нейтронов требуется дополнительный эксперимент.

Тесты детектора при повышенной температуре показали невозможность пассивации радиационных дефектов, но показали возможность их перманентного отжига. В целом в эксперименте была показана радиационная стойкость детектора к нейтронам на уровне $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, так как при ухудшении спектральных характеристик детектор продолжал устойчиво работать как нейтронный радиометр. Чувствительность детектора остается стабильной в пределах погрешности измерения.

Заключение

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

- Выполнены радиационные испытания алмазного детектора на каскадном сильноточном ускорителе КГ–2,5 с набором флюенса быстрых нейтронов до $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Суммарное время облучения в испытаниях составило 5 часов.

- В эксперименте наблюдалось радиационное повреждение детектора, проявляющееся в ухудшении его спектральных характеристик. В целом в эксперименте была показана радиационная стойкость детектора к нейтронам на уровне $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, так как при ухудшении спектральных характеристик детектор продолжал устойчиво работать как нейтронный радиометр. Чувствительность детектора остается стабильной в пределах погрешности измерения.

- Измерения спектрального отклика детектора при повышенной температуре не дали ожидаемого эффекта улучшения его спектрометрических параметров. Нагрев детектора до 200 °С практически не влиял на его работу. В процессе эксперимента наблюдалась трансформация спектрального отклика детектора с тенденцией к улучшению его параметров.

- Тесты детектора при повышенной температуре показали невозможность пассивации радиационных дефектов, но показали возможность их перманентного отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов В. Н., Мецанинов С. А., Родионов Н. Б. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 104.
2. Кононов В. Н., Боховко М. В., Кононов О. Е. и др. Источники быстрых нейтронов на основе ускорителя для нейтронной терапии / Препринт ФЭИ-2995. — Обнинск. 2005.
3. Митрофанов К. В., Егоров А. С., Пиксайкин В. М. и др. // Атомная энергия. 2014. Т. 116. № 4. С. 204.

Testing the diamond neutron detector at the KG–2.5 cascade high-current accelerator

V. N. Amosov¹, N. B. Rodionov¹, K. V. Mitrofanov², A. S. Egorov², S. A. Meshchaninov¹,
R. N. Rodionov¹, and V. M. Piksaikin²

¹Institution "Project Center ITER"
1/3 Akademik Kurchatov square, Moscow, 123182, Russia
E-mail: rodionovnb@gmail.com

²RF–IPPE SSC
1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga Region, 249033, Russia
E-mail: kmitrofanov@ippe.ru

Received May 6, 2015

Radiation tests of a diamond detector have been performed at the KG–2.5 cascade high-current accelerator. When a radiant fluence of 14 MeV neutrons has reached up to $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, a degradation of the detector operation has been observed: its spectral response disturbed due to polarization effects. Energy resolution was reduced by the factor 2.3. Counting rate of (n, α) -reaction was decreased by 7 % and its peak was shifted on 1 MeV with respect to the peak of a non-irradiated detector. However, a detector ability to operate as a neutron flux radiometer was maintained. The detector response spectra have been measured at increased temperatures.

PACS: 29.40.-n

Keywords: diamond neutron detector, accelerator, radiation hardness, testing, detector, neutron fluence, spectral response.

REFERENCES

1. V. N. Amosov, S. A. Meshchaninov, and N. B. Rodionov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 104 (2011).
2. V. N. Kononov, M. V. Bokhovko, O. E. Kononov, et al., *Sources of Fast Neutrons on the Base of an Accelerator for the Neutron Therapy*. Preprint No. FEI-2995 (Obninsk, 2005) [in Russian].
3. K. V. Mitrofanov, A. S. Egorov, V. M. Piksaikin, et al., *Atomnaya Energiya* **116**, 204 (2014).