

Физическая аппаратура

УДК 633

Система компактных алмазных спектрометров и мониторов нейтронного потока вертикальной нейтронной камеры для международного экспериментального термоядерного реактора

В. Н. Амосов, С. А. Мещанинов, Н. Б. Родионов

Для измерения двухмерного пространственного распределения источника нейтронов термоядерной плазмы в конструкции международного термоядерного реактора ИТЭР предусмотрена вертикальная нейтронная камера, которая находится в диверторной зоне установки в экстремальных условиях эксплуатации: поток нейтронов 10^5 — 10^{10} см⁻²·с⁻¹, рабочая температура 100—150 °С, технологический прогрев до 250 °С, магнитное поле до 1,5 Тл, высокий вакуум. Данные условия не позволяют использовать традиционные методы спектрометрии быстрых нейтронов. Представлены анализ работы и обоснование применения алмазных детекторов в этих условиях, а также концепция и эскизная схема системы компактных алмазных спектрометров и мониторов нейтронного потока вертикальной нейтронной камеры. Показано, что алмазный детектор не имеет ограничений для применения в условиях вертикальной нейтронной камеры ИТЭР по всем критическим параметрам.

PACS: 52.50.-b

Ключевые слова: алмазный детектор, алмазный нейтронный спектрометр, монитор нейтронного потока, ИТЭР.

Введение

Важнейшими задачами нейтронной диагностики ИТЭР является определение интенсивности нейтронного выхода, управление термоядерным горением, контроль нейтронного флюенса на первой стенке вакуумной камеры и измерение нейтронных спектров для определения параметров термоядерной плазмы.

Для измерения двухмерного пространственного распределения источника нейтронов термоядерной плазмы в конструкции ИТЭР предусмотрено два многоканальных нейтронных коллиматора, обеспечивающих измерения в горизонтальном и вертикальном направлениях. Разработка вертикальной нейтронной камеры (ВНК) поручена Российской Федерации. ВНК находится в дивертор-

ной зоне установки ИТЭР, что приводит к экстремальным условиям эксплуатации диагностик, расположенных в этой зоне. В режимах полномасштабных пусков установки ИТЭР нейтронная диагностика должна обеспечить измерение нейтронных потоков и спектров в условиях ВНК: поток нейтронов 10^5 — 10^{10} см⁻²·с⁻¹, рабочая температура 100—150 °С, технологический прогрев до 250 °С, магнитное поле до 1,5 Тл, высокий вакуум. Предварительный анализ применимости традиционных методов нейтронной диагностики (временнотечный метод, жидкие и твердотельные сцинтилляторы, полупроводниковые детекторы и др.) показывает, что в этих условиях единственной рабочей диагностикой остаются только камеры деления, технология которых хорошо отработана для ядерной энергетики. Однако камеры деления в условиях ВНК ИТЭР не могут измерить спектр быстрых нейтронов, что не позволяет разделить в измерениях потоки прямых и рассеянных нейтронов.

Для обеспечения нейтронных измерений высокотемпературной плазмы в ВНК необходимы детекторы, стойкие по отношению ко всем видам излучений, которые могли бы работать при высоких температурах. Известно, что такими свойствами обладают алмаз и алмазоподобные материалы. Высокая радиационная стойкость, способность

Амосов Владимир Николаевич, начальник группы.

Мещанинов Сергей Анатольевич, научный сотрудник.

Родионов Николай Борисович, ведущий научный сотрудник. ФГУП "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований".

Россия, 142190, Московская обл., Троицк, ул. Пушкиных, 12. Тел. (495) 334-55-80. E-mail: nbrodnik@triniti.ru

Статья поступила в редакцию 23 января 2011 г.

© Амосов В. Н., Мещанинов С. А., Родионов Н. Б., 2011

работать при повышенных температурах, химическая инертность являются наиболее важными свойствами алмаза для применений, связанных с измерениями нейтронных потоков. Алмазные детекторы имеют хорошую чувствительность, обладают высоким быстродействием и малыми размерами, что позволит разместить их в каналах коллиматора.

Детекторы из природного алмаза ранее с успехом применялись для регистрации энергетических спектров термоядерных нейтронов на нейтронных генераторах FNS [1], FNG [2], СНЕГ-13, НГМ-17 [3] и установках токамак TFTR [4], JET [5] и JT-60U [6]. В настоящее время алмазный детектор работает на установке JET в качестве монитора нейтронного потока.

Энергетическое разрешение нейтронных спектрометров на базе алмазных детекторов, показанное в работах [1—6], составляет 1—3 %, что сравнимо или превосходит энергетическое разрешение, которое можно достичь на времяпролетных спектрометрах и спектрометрах энергии протонов отдачи. При этом традиционные методы спектрометрии быстрых нейтронов громоздки, тогда как алмазные детекторы имеют малые размеры и отличаются простотой конструкции.

Алмазный детектор

Основной принцип работы алмазного детектора основан на сборе носителей заряда, возникающих под действием ионизирующего излучения в теле детектора. Высокое кристаллографическое качество применяемого алмазного материала позволяет реализовать режим полного сбора заряда, возникающего в кристалле алмаза, что обеспечивает хорошее энергетическое разрешение спектрометра, при этом эффективный объем детектора практически равен объему алмаза под контактами. Энергия заряженных продуктов реакций, поглощенных в кристалле алмаза, преобразуется в электрический заряд с коэффициентом, равным 13,2 эВ на создание одной электрон-дырочной пары.

При измерениях спектра нейтронов, испускаемых дейтериево-третиевой плазмой в токамаке ИТЭР, алмазный спектрометр регистрирует суммарную энергию продуктов реакций в теле алмазного детектора. В диапазоне энергии нейтронов 12—16 МэВ, соответствующему условиям работы термоядерной установки ИТЭР, это дает распределение поглощенной в алмазе энергии в диапазоне 0—10,3 МэВ. Сигналы, создаваемые сопутствующим гамма-излучением, а также нейтронами, образующимися в реакции D+D, не превышают по амплитуде 0,8 МэВ.

Чувствительный элемент алмазного детектора представляет собой монокристалл из природного или синтетического алмаза размером до 5×5 мм и толщиной до 0,5 мм с золотыми контактами, имеющими толщину 30 нм и нанесенными на плоскости алмазной пластины. Алмазные пластины монтируются в корпуса с разъемами типа BNC или MSA. Конструкция детектора, использованная в экспериментах [1—6], обеспечивает коаксиальное включение алмазной пластины, что дает высокую помехозащищенность. Габариты детектора 16×35 мм. Возможна и более компактная компоновка детектора. Алмазный детектор в корпусе представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алмазный детектор в корпусе

Измеряемый спектр нейтронов может быть построен как на основе анализа формы пика $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)^9\text{Be}$ реакции в алмазе, соответствующей энергетическому отклику в районе 8,4 МэВ для нейтронов с энергией 14,1 МэВ, так и в результате анализа всего спектра отклика детектора с энергией более 2 МэВ, что обеспечит увеличение эффективной чувствительности спектрометра почти на порядок величины. Для такого анализа требуется иметь полную функцию преобразования энергии нейтрона в продукты реакции на углероде в диапазоне энергий, соответствующих техническим условиям ИТЭР, и программу обработки для решения обратной задачи восстановления нейтронного спектра.

Расчетная чувствительность типичного алмазного детектора с размером кристалла 4×4×0,3 мм для 14,1 МэВ нейтронов составляет $\eta = NV\sigma = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ на флюенс нейтронов (нейтрон/см²) в пике $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)^9\text{Be}$ реакции и $\eta = NV\sigma_s = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ при регистрации энергии, поглощенной в алмазе, с порогом более 2 МэВ. Здесь N — концентрация ядер ^{12}C в одном см³, V — объем детектора, σ — сечение $^{12}\text{C}(n, \alpha_0)^9\text{Be}$ реакции, σ_s — суммарное сечение всех процессов с образованием заряженных

продуктов ядерных реакций на ядре ^{12}C с суммарной энергией продуктов более 2 МэВ.

В условиях ВНК ИТЭР при плотности нейтронных потоков $10^5\text{--}10^{10}\text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ это соответствует работе монитора со скоростью счета $4\cdot 10^1\text{--}4\cdot 10^6\text{ с}^{-1}$. Таким образом, требуемая для технологических систем установки ИТЭР 10 % точность счетного канала измерения нейтронного потока обеспечивается при временном разрешении в 1 мс только при плотности нейтронных потоков более $2,5\cdot 10^8\text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$. При меньших потоках временное разрешение при той же точности соответственно ухудшается. Принципиально возможно увеличить чувствительность алмазного детектора в 10–20 раз, если использовать наборный детектор с несколькими кристаллами. Это позволит обеспечить требуемую точность при потоках более $10^7\text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$. Дальнейшее увеличение размера кристалла на данный момент трудно исполнимо и дорого. В спектрометрическом режиме измерение спектра за 100 мс с приемлемой статистикой (>1000 событий) возможно при нейтронных потоках $>10^8\text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$, а при увеличенном размере кристалла $>10^7\text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$.

С другой стороны, при предельных нейтронных потоках до $10^{10}\text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ работа спектрометра сильно осложняется из-за наложения импульсов. Для этих режимов целесообразно использовать дополнительный детектор с кристаллом алмаза уменьшенного размера ($1\times 1\times 0,1\text{ мм}$). Таким образом, используя спаренную спектрометрическую систему, можно расширить динамический диапазон прибора на два порядка.

Структура системы

Система компактных алмазных спектрометров и мониторов нейтронного потока вертикальной нейтронной камеры включает 20 однотипных каналов измерений, обеспечивающих измерения спектров и потоков быстрых нейтронов по десяти направлениям коллиматора нейтронной камеры. В каждом канале коллиматора устанавливается по два алмазных детектора с кристаллами алмаза разного размера.

Спектрометр-монитор нейтронных потоков на базе алмазного детектора включает в себя собственно алмазный детектор (АД), предусилитель (ПУ), скоростной АЦП с системой сбора и цифровой обработки данных, усилитель-формирователь (УФ), блок дискриминаторов уровня сигналов (БДУС), блок счетчиков (БС) и спектрометрический АЦП. Сигналы со всех АЦП записываются в память компьютера, программа обработки этих сигналов выполняет функцию анализатора им-

пульсов (АИ). Алмазный детектор и предварительный усилитель сигнала детектора размещаются в зоне нейтронных полей; УФ, БДУС, БС и все АЦП могут быть размещены за биологической защитой и не требуют специальных решений по их эксплуатации в условиях ИТЭР. Блок-схема спектрометра показана на рис. 2.

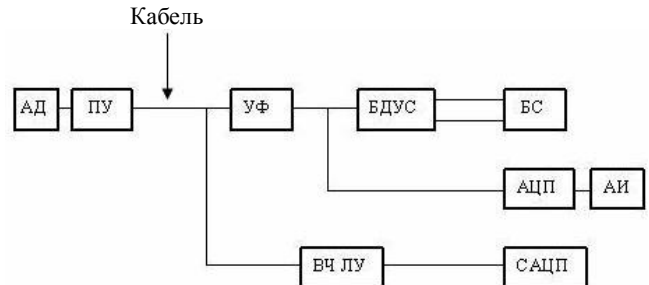


Рис. 2. Блок-схема спектрометра

В качестве базовой схемы для блока детектирования системы компактных спектрометров и мониторов нейтронного потока для ВНК принимается испытанное на установке JET решение, использующее вынесенный на длинной коаксиальной линии предусилитель [7]. Разработанное устройство обладает приемлемыми спектрометрическими характеристиками, повышенной помехозащищенностью, низким потреблением и малыми габаритами выносного блока. Однако данное устройство не обладает достаточной радиационной стойкостью. Имеется также альтернативное схемотехническое решение, а именно, устройство детектирования с вынесенным на 20–30 м детектором, которое можно принять в качестве основы для разработки блока детектирования алмазного спектрометра ВНК ИТЭР.

Анализ условий работы

Критические условия для проектирования диагностик, размещенных в каналах ВНК, следующие: плотность потока нейтронов $10^5\text{--}10^{10}\text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, температура $100\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$, магнитное поле до 1,5 Тл, высокий вакуум.

Испытания алмазных детекторов на мощных источниках гамма-излучения показали, что детекторы практически не изменяют своих характеристик при дозах гамма-облучения, достигающих 10 МГр. Доказанный радиационный ресурс спектрометрических алмазных детекторов в потоках быстрых нейтронов составляет до 10^{14} см^{-2} [8]. При таком радиационном ресурсе алмазный детектор будет работоспособен в течение 100 полномасштабных пусков установки ИТЭР, в которых будет достигнут максимальный нейтронный выход. После этого детектор подлежит замене.

Температурный диапазон устойчивой работы детекторов из природного алмаза от 0 до +150 °С известен из ранних публикаций [8]. Выполненные специально для этой работы термические испытания детекторов из сверхчистого синтетического алмаза показали, что параметры энергетического разрешения детекторов не изменяются при температуре до 200 °С.

Сильное магнитное поле, в принципе, может оказывать влияние на работу алмазного детектора при значительных размерах детекторной структуры из-за эффекта Холла. Однако в типичной конфигурации детектора носители заряда собираются на контакты, имеющие размеры много больше межэлектродного промежутка. Так, линейный размер контакта — до 5 мм, расстояние между контактами 0,3—0,4 мм. В такой конфигурации сильное магнитное поле не должно оказывать значительного влияния на работу чувствительного элемента алмазного детектора. Более значительным может быть фактор силовых воздействий сильного магнитного поля на элементы конструкции детектора. Для данной работы были проведены тесты работоспособности алмазных детекторов в магнитном поле 1 Тл, которые не выявили его влияния на их работу.

При соответствующем исполнении конструкции корпуса (с использованием вакуумно-чистых, немагнитных и термостойких материалов) детектор не имеет ограничений по применению в условиях ВНК ИТЭР. Схема размещения алмазных детекторов в каналах коллиматора ВНК показана на рис. 3.

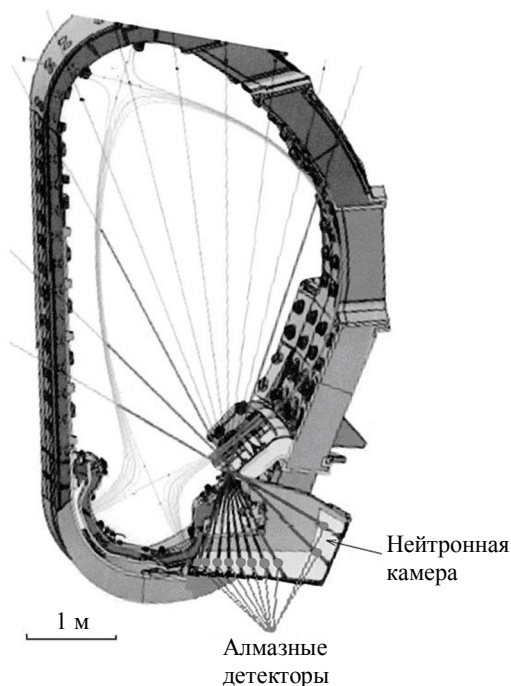


Рис. 3. Размещение алмазных детекторов в каналах коллиматора ВНК ИТЭР.

На рисунке показаны 10 линий наблюдения коллиматора ВНК

Заключение

Алмазный детектор не имеет ограничений для применения в условиях ВНК ИТЭР по всем критическим параметрам.

Оценки показали, что требуемая 10%-ная точность счетного канала измерения нейтронного потока обеспечивается при временном разрешении в 1 мс только при нейтронных потоках более $2,5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. За счет увеличения размера алмазного детектора можно обеспечить требуемую точность при меньших потоках, но не менее $10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. При максимальных потоках нейтронов целесообразно применить дополнительный канал измерения с детектором на базе кристалла алмаза уменьшенного размера.

В спектрометрическом режиме измерение спектра за 100 мс с приемлемой статистикой (>1000 событий) возможно при нейтронных потоках $>10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, а при увеличенном размере кристалла $>10^7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

В реальном исполнении спектрометра требуется разработка конструкции детектора, удовлетворяющей технологическим требованиям ИТЭР, и проверка работы изделия в целом в условиях, близких к рабочим параметрам ВНК ИТЭР – долговременной стойкости контактов при повышенных температурах, механической прочности крепления кристалла в корпусе в сильных магнитных полях и реальной радиационной стойкости в нейтронных потоках.

Литература

1. Krasilnikov A. V., Kaneko J., Isobe M., Maekawa F., Nishitani T., Isobe M. // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68. P. 720.
2. Krasilnikov A. V., Angelone M., Pillon M. // Nucl. Instrum. Methods B. 1995. V. 101. P. 473.
3. Красильников А. В., Квасков В. Б. Алмаз и ионизирующее излучение: В кн. "Природные алмазы России"/Под ред. В. Б. Кваскова. — М.: Полярон, 1997.
4. Krasilnikov A. V., Azizov E. A., Khrunov V. S., Roquemore A. L., Young K. M. // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68 (1). P. 553.
5. Krasilnikov A. V., Amosov V. N., Van Belle P., Jarvis O. N., Sadler // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2002. V. 476. No.1, 2.
6. Krasilnikov A. V., Nishitani T., Kaneko J., Sasao M. // Fusion Engineering and Design. 1997. V. 34, 35. P. 573.
7. Амосов В. Н., Красильников А. В., Скопинцев Д. А., Мещанинов С. А., Красильников В. А. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 108.
8. Козлов С. Ф. Алмазные детекторы ядерных излучений: В кн. "Алмаз в электронной технике". — М.: Энергоатомиздат, 1990.

The system of compact diamond spectrometers and neutron flux monitors for vertical neutron camera of international thermonuclear experimental reactor ITER

V. N. Amosov, S. A. Meshchaninov, N. B. Rodionov

SRC RF "Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research", 12 Pushkovy str., Troitsk,
Moscow region, 142190, Russia
E-mail: rodionov@trtk.ru

In the construction of international thermonuclear experimental reactor ITER, the vertical neutron camera is necessary for measurement of two dimensional space distribution of thermonuclear plasma neutron source. The vertical neutron camera is located in the divertor zone of the ITER installation in extreme operation conditions: neutron flux up to 10^5 — 10^{10} $s^{-1}\cdot cm^{-2}$, temperature 100—150 °C, technological heating up to 250 °C, magnetic field 1.5 T, high vacuum. These conditions do not allow using traditional fast neutron spectrometry techniques. The aim of this work is the analysis of operation conditions and substantiation of diamond detectors application. The conception and sketch scheme of the system of diamond neutron spectrometers and flux monitors for vertical neutron camera are given. It is shown that diamond detector has no restrictions for application in ITER vertical neutron camera conditions on the all critical parameters.

PACS: 52.50.-b

Keywords: diamond detector, diamond neutron spectrometers, neutron flux monitor, ITER.

Bibliography — 8 references.

Received January 21, 2011