

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
СЦИНТИЛЛЯТОРОВ CsI(Tl), ZnO(Ga), YAG(Ce) К ФОНОВОМУ
ИЗЛУЧЕНИЮ ПЛАЗМЫ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ
ТОКАМАКА-РЕАКТОРА ИТЭР**

© 2012 г. В. Г. Несеневич, В. И. Афанасьев, С. С. Козловский*, Д. В. Макарьин*,
А. Д. Мельник, М. И. Миронов, М. П. Петров, С. Я. Петров, Ф. В. Чернышев

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Россия, 194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, 26*

**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, 195251, С.-Петербург, ул. Политехническая, 29*

E-mail: vnesenevich@npd.ioffe.ru

Поступила в редакцию 14.07.2011 г.

Рассмотрены проблемы, связанные с регистрацией потока атомов перезарядки на токамаке-реакторе ИТЭР в условиях интенсивного фонового излучения плазмы. Представлены результаты измерения фоновой чувствительности по отношению к нейтронному и γ -излучению для сцинтилляционного детектора на основе трех различных кристаллов: CsI(Tl), ZnO(Ga) и YAG(Ce). Проведено сравнение сцинтилляторов и сделаны выводы о возможности их использования в детекторах атомных анализаторов, создаваемых в настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН для установки ИТЭР.

1. ВВЕДЕНИЕ

Корпускулярная диагностика термоядерной плазмы по потоку атомов перезарядки основана на измерении энергетических спектров атомов изотопов водорода и гелия, излучаемых плазмой в результате реакций перезарядки ионов плазмы на атомах, присутствующих в плазме или вводимых в нее специальными методами. Приборы, позволяющие измерять абсолютный поток и получать энергетические спектры атомов плазмы, — атомные анализаторы — разрабатываются в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и широко используются на различных плазменных установках. Разделение изотопов по массе с одновременным анализом по энергии становится возможным в результате ионизации исходного нейтрального потока атомов и последующего прохождения ионов в параллельных электрическом и магнитном полях прибора.

В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе создается система атомных анализаторов, предназначенных для работы на строящемся международном термоядерном токамаке-реакторе ИТЭР. Система включает в себя атомный анализатор тепловых энергий LENPA (10–200 кэВ) и анализатор высоких энергий HENPA (100–4000 кэВ) [1].

Одним из основных требований к анализаторам является обеспечение работы приборов в условиях интенсивного фонового излучения нейтронов, возникающих в результате термоядерной реакции между дейтерием и тритием: $D + T \rightarrow$

$\rightarrow {}^4\text{He}^{2+} + n$. Энергия образующихся нейтронов составляет 14.1 МэВ. В результате рассеяния термоядерных нейтронов на конструктивных элементах реактора образуется нейтронное поле с непрерывным энергетическим спектром. Поток нейтронов сопровождается соответствующим ему по порядку величины потоком жесткого γ -излучения. В месте установки детекторов атомных анализаторов на ИТЭР расчетные значения потока нейтронов составляют от $3.3 \cdot 10^6$ до $2.15 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [2]. При этом средняя скорость счета полезных сигналов в детекторных каналах анализаторов для атомов дейтерия и трития равна $\sim 10^3 - 10^5 \text{ с}^{-1}$ [1].

Одним из основных методов улучшения соотношения между полезным сигналом и фоном является спектральный анализ. Поэтому в качестве детекторов атомных анализаторов LENPA и HENPA были выбраны спектрометрические сцинтилляционные детекторы. Кроме того, эти детекторы обладают высокой радиационной стойкостью, которая превышает, например, стойкость полупроводниковых детекторов более чем на два порядка [3].

Для обеспечения минимальной чувствительности к фоновому излучению сцинтилляционные кристаллы должны иметь малую толщину, не превышающую длину пробега регистрируемых ионов (от единиц до нескольких десятков микрон). В работе [3] нами уже были представлены результаты измерения фоновых характеристик сцинтилляционного детектора на основе ф.э.у.

Основные свойства сцинтилляторов

Сцинтиллятор	Плотность, г/см ³	Время высвечивания τ , нс	Световыход, фотонов/МэВ	Отношение α/β
CsI(Tl)	4.51	600	$54 \cdot 10^3$	1/3
ZnO(Ga)	5.6	0.7	$15 \cdot 10^3$	—
YAG(Ce)	4.55	70	$8 \cdot 10^3$	1/10

НАМАМАТСУ H8500D и тонких кристаллов CsI(Tl). Цель данной работы состоит в исследовании сцинтилляторов двух новых типов и сравнении полученных результатов с соответствующими данными для кристаллов CsI(Tl).

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Основные достоинства сцинтиллятора CsI(Tl) — высокий световыход и малая гигроскопичность. К недостаткам относится относительно большое время высвечивания. Необходимость формирования сигнала длительностью порядка нескольких микросекунд может приводить к ухудшению соотношения сигнал/фон и искажению спектра в результате наложений сигналов при высоких нагрузках.

Использование быстрых органических сцинтилляторов в детекторах атомных анализаторов невозможно в силу их высокой чувствительности к нейтронному излучению и низкому отношению световыхода для ионов по отношению к γ -излучению [4]. Однако существуют быстрые неорганические сцинтилляторы, обладающие малым временем высвечивания и достаточно высоким световыходом. К таким кристаллам, в частности, относятся ортоалюминат иттрия $Y_3Al_5O_{12}(Ce)$ (YAG(Ce)) и оксид цинка ZnO(Ga). Основные свойства этих сцинтилляционных кристаллов приведены в таблице.

В последней графе таблицы приведено измененное нами соотношение α/β между световыходами для α -частиц и электронов (γ -излучения) для сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и YAG(Ce). Как будет показано ниже, это соотношение влияет на чувствительность кристалла к фоновому излучению.

Измерение проводилось с помощью коллимированного источника α -частиц ^{241}Am ($E_\alpha \approx 5.5$ МэВ) и γ -источника ^{241}Am из набора ОСГИ по пику $E_\gamma = 59.5$ кэВ. Необходимая энергия α -частиц устанавливалась путем изменения расстояния между источником и кристаллом и рассчитывалась по остаточному пробегу с использованием программного пакета SRIM-2008 [5]. Для сцинтиллятора ZnO(Ga) измерить отношение α/β не удалось из-за низкого энергетического разрешения и силь-

ной нелинейности световыхода кристалла при малых энергиях α -частиц.

Сцинтилляторы CsI(Tl) были изготовлены нами методом термического вакуумного напыления. Сцинтилляторы ZnO(Ga) получены в ГОИ им. С.И. Вавилова методом горячего прессования порошка оксида цинка с последующей полировкой до необходимой толщины [6]. Кристалл YAG(Ce) был изготовлен по нашему заказу компанией Marktech Intl, Inc. (<http://www.mkt-intl.com>). Все сцинтилляторы были нанесены на подложку из кварцевого стекла размером 12×12 мм.

Следует отметить, что у полученных нами экспериментальных образцов сцинтилляторов YAG(Ce) и ZnO(Ga), помимо быстрой компоненты сцинтилляционной вспышки, была замечена медленная компонента с $\tau \sim (400-500)$ нс, причем в случае ZnO(Ga) на нее приходится значительная часть световыхода ($\sim 60\%$).

Как было указано выше, для обеспечения оптимального соотношения сигнал/фон толщина сцинтиллятора должна быть близка к пробегу регистрируемых частиц. Толщина экспериментальных образцов YAG(Ce) и ZnO(Ga) была выбрана равной 10 мкм, что соответствует пробегу α -частиц с энергией ~ 4 МэВ. Пробег α -частиц данной энергии в CsI(Tl) составляет ~ 18.5 мкм, исходя из чего для сравнения фоновых характеристик сцинтилляторов был выбран образец CsI(Tl) толщиной 20 мкм.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерение фоновой чувствительности кристаллов проводилось с помощью ф.э.у. НАМАМАТСУ H8500D, представляющего собой матрицу из $64 (8 \times 8)$ анодов площадью $\sim 6 \times 6$ мм² каждый. Под чувствительностью кристалла здесь и далее мы подразумеваем чувствительность самого сцинтилляционного детектора, т.е. сборки из кристалла и ф.э.у. Три кристалла устанавливались на входном окне ф.э.у. с помощью вязкой пасты КПД, обеспечивающей одновременно необходимый оптический контакт. Каждому кристаллу соответствовала группа из четырех анодов ф.э.у., объ-

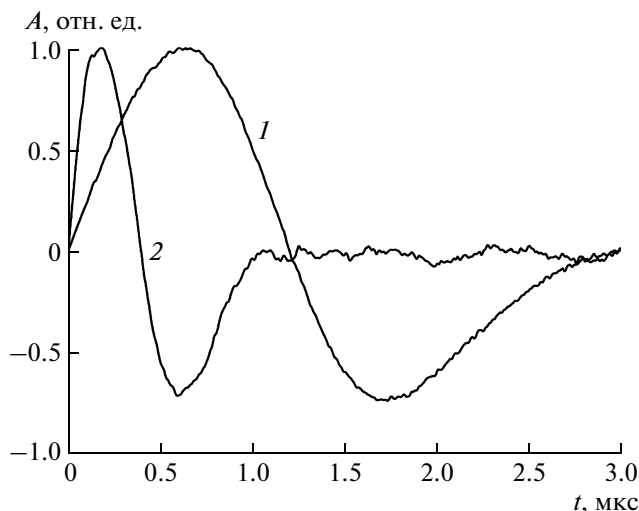


Рис. 1. Нормированные по амплитуде сигналы с выхода усилителя-формирователя при регистрации α -частиц с использованием различных кристаллов: 1 – CsI(Tl), 2 – YAG(Ce), ZnO(Ga).

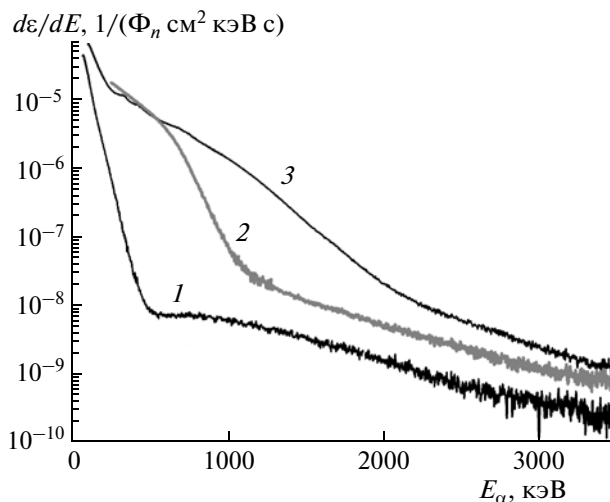


Рис. 2. Дифференциальная фоновая чувствительность сцинтилляционного детектора для исследуемых кристаллов: 1 – CsI(Tl), 2 – ZnO(Ga), 3 – YAG(Ce).

единенных между собой. Неиспользуемые аноды были заземлены.

Для получения нейтронного потока, соответствующего фоновым условиям в месте расположения анализаторов на установке ИТЭР, был использован циклотрон МГЦ-20 НИИЯФ СПбГПУ ((*d, n*)-реакция на толстой бериллиевой мишени). Энергия пучка дейтронов составляла 9 МэВ, что позволило генерировать быстрые нейтроны с энергией до 14 МэВ. При этом формировалось поле вторичного излучения, близкое к ожидаемому в условиях работы атомных анализаторов на установке ИТЭР [1, 2].

Ф.э.у. с установленными на него кристаллами был помещен в стальную камеру с толщиной стенок 5 мм. Камера располагалась на оси пучка на расстоянии 30 см от мишени. Необходимая интенсивность нейтронного потока достигалась при изменении тока пучка дейтронов от 1 до 16 мкА. В месте установки детектора поток нейтронов составлял от 10^6 до 10^8 нейтронов/(см² с), что соответствовало расчетным значениям потока в месте расположения анализаторов и их детекторов на установке ИТЭР.

Точковый сигнал с анодов ф.э.у. по короткому кабелю поступал на вход спектрометрического усилителя. Для предотвращения смещения постоянного уровня усилителя при высоких нагрузках было использовано биполярное формирование.

На рис. 1 показана форма выходных импульсов усилителя для сигналов, поступающих с кристаллов YAG(Ce) и CsI(Tl). Полная длительность сигналов составляет 1 и 3 мкс соответственно. При этом время нарастания положительной полуволны для сигнала от YAG(Ce) равно 200 нс, что

обеспечивает практически полное интегрирование заряда, получаемого на выходе ф.э.у. от быстрой компоненты высвечивания кристалла. Для импульсов, поступающих от сцинтиллятора ZnO(Ga), было использовано идентичное формирование.

Длительное время высвечивания сцинтиллятора CsI(Tl) не позволяло провести полное интегрирование заряда без снижения быстродействия системы регистрации, поэтому для сокращения длительности сигнала время нарастания положительной полуволны было выбрано равным 600 нс, что соответствует времени высвечивания данного кристалла и собиранию примерно трети заряда.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Дифференциальную фоновую чувствительность детектора $d\epsilon/dE$ определим следующим образом:

$$\frac{d\epsilon}{dE} = \frac{1}{S\Phi_n t} \frac{dN}{dE},$$

где S , см² – площадь сцинтилляционного кристалла; Φ_n , см⁻² · с⁻¹ – поток нейтронов в месте установки детектора; t , с – время измерения; dN/dE , кэВ⁻¹ – энергетический спектр сигналов, полученных на выходе детектора за время измерения при воздействии формируемого поля фонового излучения. Для абсолютной калибровки спектров был использован α -источник ²⁴¹Am.

На рис. 2 приведены результаты измерения фоновой чувствительности детектора для кристаллов трех типов. Механизм формирования подобных спектров рассмотрен в работе [3]. Отметим только, что в области малых энергий, порядка нескольких сотен килоэлектронвольт,

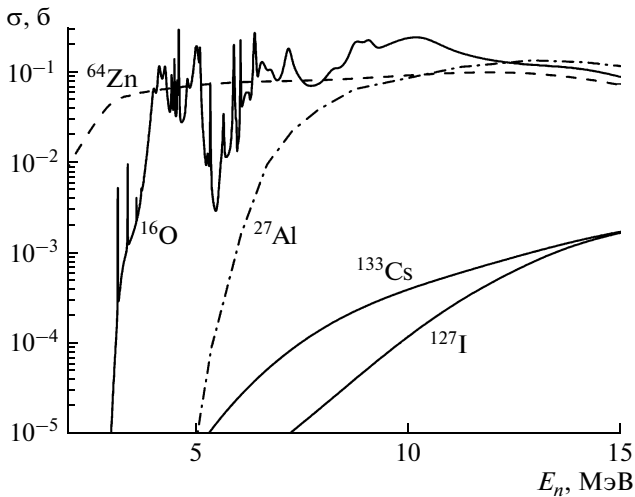


Рис. 3. Сечения (n, α) -реакции при температуре $T = 300$ К для различных химических элементов, входящих в состав сцинтилляторов.

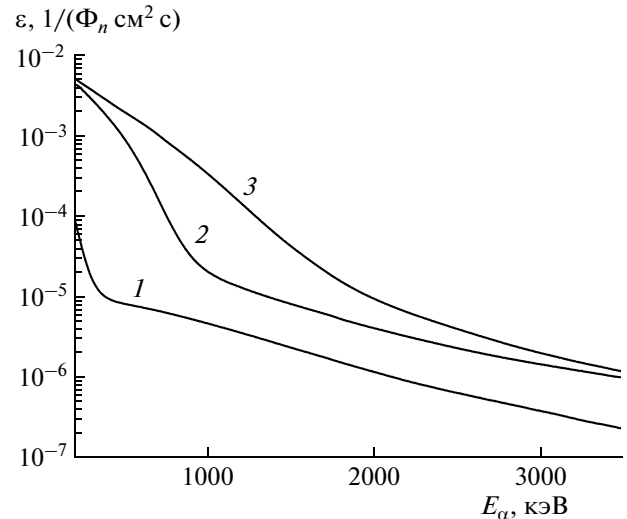


Рис. 4. Интегральная фоновая чувствительность сцинтилляционного детектора для исследуемых кристаллов: 1 – CsI(Tl), 2 – ZnO(Ga), 3 – YAG(Ce).

форма спектра определяется регистрацией электронов и γ -квантов, в то время как при энергиях $E_\alpha \geq 1$ МэВ основной вклад дает регистрация протонов и α -частиц, образующихся в результате ядерных реакций на быстрых нейтронах.

Во всем представленном диапазоне энергий фоновая чувствительность сцинтиллятора CsI(Tl) является наименьшей, несмотря на то, что его толщина в два раза превышает толщину остальных кристаллов. Объяснить это явление, по-видимому, можно отсутствием легких элементов в химическом составе этого сцинтиллятора. Сечения реакций (n, α) и (n, p) на таких элементах, как алюминий, цинк и кислород, присутствующих в составе ZnO(Ga) и YAG(Ce), значительно превышает сечение соответствующих реакций для цезия и иода (см. рис. 3, где для примера показаны сечения реакции (n, α) [7]). Рождаясь непосредственно в чувствительном объеме детектора, тяжелые заряженные частицы регистрируются с вероятностью ~ 1 . Кроме того, можно утверждать, что низкое отношение α/β для сцинтиллятора YAG(Ce) также приводит к увеличению фоновой чувствительности в области малых энергий, в результате чего экспоненциальная часть спектра, обусловленная в основном регистрацией электронов, смещается в сторону больших энергий.

Определив интегральную чувствительность детектора как

$$\varepsilon(E_0) = \int_{E \geq E_0} \left(\frac{d\varepsilon}{dE} \right) dE,$$

можно оценить число фоновых отсчетов при энергии выше данного порогового значения E_0 для единичного потока нейтронов. Эта характе-

ристика позволяет рассчитать соотношение сигнал/фон для детектора при заданном пороге дискриминации и известной интенсивности фонового излучения.

На рис. 4 приведены кривые интегральной чувствительности для исследуемых сцинтилляционных кристаллов. Оптимальные фоновые характеристики имеет кристалл CsI(Tl). В области малых энергий он обеспечивает соотношение сигнал/фон на 1–2 порядка большее, чем кристаллы YAG(Ce) и ZnO(Ga). Сцинтиллятор ZnO(Ga) может рассматриваться как альтернатива кристаллу CsI(Tl) только при энергиях $E_\alpha \geq 1$ МэВ, однако и в этом случае его фоновая чувствительность примерно в три раза выше.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам сравнения фоновых характеристик сцинтилляционного детектора на основе трех различных кристаллов: CsI(Tl), ZnO(Ga) и YAG(Ce) – показано, что наилучшими характеристиками для применения в детекторах атомных анализаторов в условиях работы установки ИТЭР обладает кристалл CsI(Tl). Кристалл ZnO(Ga) может быть использован только при достаточно высоких энергиях регистрируемых частиц, ≥ 1 МэВ. Сцинтиллятор YAG(Ce) из трех представленных кристаллов обладает наибольшей чувствительностью к нейтронному и γ -излучению и в условиях установки ИТЭР в атомных анализаторах неприменим.

Работа выполнена в рамках государственных контрактов № Н.4к.52.90.10.1140 и № Н.4к.52.90.11.1094. Генеральный заказчик – Федеральное агентство по атомной энергии (Росатом).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2010. V. A 621. P. 456.
2. *Ljublin B.V., Petrov M.P., Sheludyakov S.V.* // Plasma Devices and Operations. 2007. V. 15. № 1. P. 1.
3. *Афанасьев В.И., Козловский С.С., Макарьин Д.В. и др.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 5. P. 440.
4. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Атомиздат, 1970.
5. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Ziegler M.D.* The Stopping and Range of Ions in Matter. <http://www.srim.org/>
6. *Горохова Е.И., Родный П.А., Ходюк И.В. и др.* // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 11. P. 66.
7. Japanese Evaluated Nuclear Data Library. <http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html>