

15

Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов

© В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин,
С.Н. Аксенов, А.А. Столяров

Институт ядерных исследований РАН, Москва
E-mail: marin@inr.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2015 г.

Описан высокоэффективный сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS(Ag)/LiF. В детекторе применен новый способ считывания света на основе световода и лавинных фотодиодов, позволяющий отказаться от оптических волокон и фотоумножителей. Приведены результаты тестов, полученных на импульсном источнике нейтронов „РАДЕКС“ в ИЯИ РАН. С помощью данных детекторов успешно получены дифрактограммы тестовых образцов.

В настоящее время в качестве детекторов тепловых нейтронов наиболее распространены пропорциональные счетчики на основе гелия-3. Несмотря на ряд преимуществ, таких как нечувствительность к гамма-излучению, довольно высокая эффективность регистрации тепловых нейтронов ($\sim 60\text{--}90\%$), все большую роль начинают играть твердотельные детекторы тепловых нейтронов на основе разнообразных сцинтилляторов. Причиной такого замещения одного вида детекторов другим является резко возросший дефицит изотопа He-3. Используемый сцинтиллятор должен быть недорогим, иметь большой световыход, малое время высвечивания и низкую гамма-чувствительность. Таким требованиям удовлетворяет, в частности, сцинтиллятор ZnS(Ag)/LiF, однако данное вещество непрозрачно, что затрудняет съем светового сигнала. Сцинтиллятор ZnS(Ag)/LiF обладает чувствительностью к гамма-квантам на уровне 10^{-6} (по данным производителя), световыходом 160 000 фотонов на нейтрон. Входящие в состав сцинтиллятора компоненты имеют резко различающиеся коэффициенты преломления — около 2.4 для кристалла ZnS и примерно 1.3 для LiF. Это обстоятельство затрудняет сбор света от сцинтилляций и накладывает



Рис. 1. Первый вариант счетчика тепловых нейтронов: 1 — сцинтиллятор ZnS(Ag)/LiF, 2 — световод (органическое стекло), 3 — фокусирующая призма световода, 4 — лавинный фотодиод.

жесткое ограничение на максимально возможную толщину сцинтиллятора из-за затухания света внутри сцинтиллятора, поэтому считалось, что классические способы светосбора (пластиковые световоды, оптический контакт) малопригодны для счетчиков нейтронов большой площади и сложных геометрических форм. Одним из вариантов регистрации сцинтилляционных вспышек являлся съем светового сигнала посредством спектросмещающих оптических волокон [1]. Поскольку оптоволоконно переизлучает всего лишь около 4% света, то для съема сигнала используются фотоумножители, сигнал с которых эквивалентен регистрации 3–5 фотоэлектронов на один нейтрон. Также данные волокна чувствительны к гамма-квантам, что увеличивает чувствительность сцинтиллятора к гамма-квантам и требует дополнительной электроники для выделения нейтронных событий. Чувствительность лавинного фотодиода (ЛФД-SiPM) позволяет регистрировать даже одnofотонные события. Вместе с тем возникает риск подавления сигнала тепловыми шумами лавинного фотодиода (ЛФД-SiPM). Снизить шумы можно путем охлаждения фотодиодов или посредством применения схемы временных совпадений. Последний способ не требует энергоемких охлаждающих элементов и поэтому был выбран при разработке прототипа нового детектора.

Разработкой ИЯИ РАН оптоволоконно заменяется на световод, а фотоумножитель — на лавинный фотодиод (ЛФД-SiPM), при этом электрический сигнал детектора увеличился в 8 раз и стал эквивалентен 40 фотоэлектронам на один нейтрон [2]. Схема первого варианта счетчика тепловых нейтронов приведена на рис. 1.

Пластины сцинтиллятора ZnS(Ag)/LiF (с эффективностью 27%) расположены с двух сторон от световода для получения эффективности

не хуже 50%. Вся конструкция обматывается тефлоновой лентой. Отметим, что сцинтиллятор здесь выполняет дополнительную функцию диффузионного отражателя. Толщина световода соответствует геометрическим размерам фотодиода. Поскольку размер чувствительной области фотодиода в несколько раз меньше ширины световода, на торцах световода используются фоконы, собирающие свет на фотодиод. Большой световыход сцинтиллятора ZnS(Ag)/LiF, высокая квантовая эффективность фотодиодов и прямая транспортировка света к фотодетекторам обеспечивают амплитуду сигналов на фотодиодах на уровне десятков фотоэлектронов. Активная площадь детектора $10 \times 100 \text{ mm}^2$. Усиление сигнала производится зарядочувствительными усилителями со временем интегрирования $1 \mu\text{s}$, что соответствует времени высвечивания ZnS. Благодаря большому времени интегрирования усилители являются помехоустойчивыми. Принцип работы счетчика тепловых нейтронов заключался в следующем. Нейтроны, падающие на сцинтилляционный экран, вызывают световую вспышку. Фотоны из сцинтиллятора попадают в световод и транспортируются к фотодиодам, где происходит преобразование светового сигнала в электрический. Сигналы с фотодиодов поступают в усилитель-формирователь, где происходят усиление, проверка на совпадение сигналов от двух лавинных фотодиодов, и через выходной формирователь сигнал в формате NIM поступает в систему регистрации.

На рис. 2 приведена фотография сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов первого и второго варианта, и усилителя-формирователя. Выгодной особенностью является компактность и легкость, не требуются громоздкие источники высоковольтного напряжения.

Одним из способов увеличения эффективности детектора является использование сцинтилляторов с содержанием LiF до 42%, что влечет за собой уменьшение светосбора примерно на 30%. Увеличения светосбора, компенсирующего данную потерю, удалось добиться, применив комбинацию двух способов:

1. Применение оптической смазки или оптического клея с коэффициентом преломления $K = 1.6$ позволяет заменить воздух ($K = 1$) между световодом из оргстекла ($K = 1.5$) и сцинтиллятором ($K = 2.4$), позволяет улучшить переход света от сцинтиллятора в световод. Обратный переход света из световода ($K = 1.5$) в сцинтиллятор (2.4) затруднен, и свет распространяется вдоль по световоду в обе стороны. Сцинтиллятор в этом случае выполняет функцию диффузного отражателя.

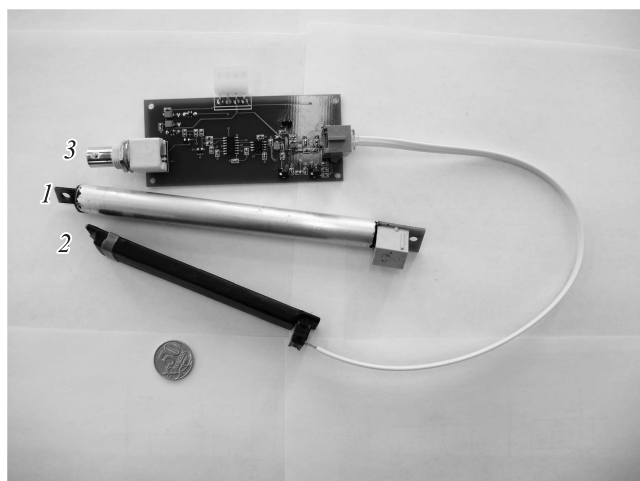


Рис. 2. Фотография первого (1) и второго (2) варианта сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов и усилителя формирователя (3).



Рис. 3. Схема технологии „рыбий глаз“.

2. Применение технологии „рыбий глаз“ (использование оптической линзы) при работе с плоским световодом. Таким образом удалось увеличить световыход до 150 фотоэлектронов. Принцип этой технологии детектора показан на рис. 3.

Таким образом, применение более эффективного сцинтиллятора с увеличенным содержанием LiF до 42% и технологии увеличения светосбора позволило получить счетчик тепловых нейтронов с эффективностью 70%. Этот счетчик полностью заменяет собой гелиевый счетчик высокого давления по эффективности. Конструкция счетчика

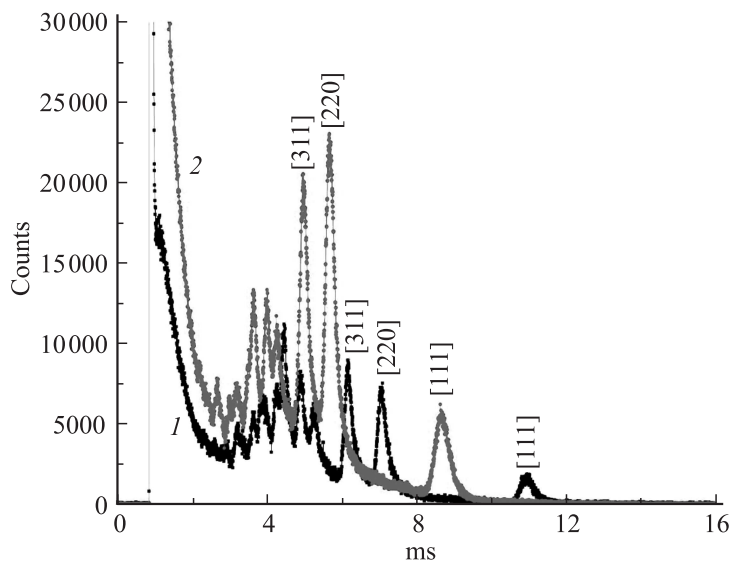


Рис. 4. Нейтронограммы порошка технического алмаза, полученные с помощью первого (1) и второго (2) варианта сцинтилляционного счетчика нейтронов. Над пиками указаны индексы Миллера.

также изменилась. Были изготовлены детекторы размером 15×100 mm с эффективностью как 50%, так и 70%.

В данных детекторах применяются лавинные фотодиоды фирмы Sensl тип S. Особенностью этих фотодиодов является линейная зависимость теплового шума от перенапряжения на фотодиоде. Следовательно, детекторы не требуют индивидуальной настройки по шумам. Детекторы как первого варианта, использующие фоконь и лавинные фотодиоды фирмы КЕТЕК [3], так и второго варианта, выполненные по технологии „рыбий глаз“ и с фотодиодами фирмы SENSL [4], были протестированы на импульсном источнике нейтронов РАДЕКС ИЯИ РАН [5]. Детекторы были установлены в детектирующие блоки макета дифрактометра. На рис. 4 приведены времяпролетные спектры или дифрактограммы, полученные со сцинтилляционных счетчиков различных конструкций. Эти счетчики стояли под различными углами к падающему пучку и работали одновременно. В качестве образца был выбран порошок технического алмаза. На данных спектрах четко

различимы пики Брэгга с индексами [111], [220], [311]. Хорошо видно, что счетчики как первого, так и второго варианта имеют большую эффективность регистрации нейтронов.

Особенностью данных детекторов нейтронов является:

1. Отсутствие необходимости жесткого подбора напряжения смещения лавинных фотодиодов.

2. Отсутствие теплового шума детектора нейтронов при температуре окружающей среды до $+27^{\circ}\text{C}$ и пороге усилителя формирователя 10 фотоэлектронов.

3. Сохранение низкой чувствительности к гамма-квантам $\sim 10^{-6}$ за счет применения в качестве световода органического стекла.

Результаты теста на импульсном источнике нейтронов РАДЕКС ИЯИ РАН [5] показали, что разработанные сцинтилляционные детекторы вполне могут заменить классические гелиевые детекторы высокого давления. Это помехоустойчивая, компактная и недорогая электроника. Детекторы не требуют индивидуальной настройки усилителей. Отсутствие высоковольтного питания и фотоумножителей делает применение данных детекторов перспективным.

Работа выполнена в рамках госзадания ИЯИ РАН, программы фундаментальных исследований президиума РАН № 24 „Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов,“ и программы ОФН РАН „Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии“. В заключение авторы статьи приносят благодарность Ф.Ф. Губеру и А.П. Ивашкину за оказанную помощь в работе, а также Л.В. Кравчуку Л.В. и Э.А. Коптелову за внимание к работе.

Список литературы

- [1] Кузьмин Е.С., Дроздов В.А., Жук В.В. и др. // ПТЭ. 2008. № 5. С. 5–15.
- [2] Губер Ф.Ф., Ивашкин А.П., Марин В.Н., Садыков Р.А. // Сцинтилляционный ZnS(Ag)/LiF детектор тепловых нейтронов со съемом сигнала лавинными фотодиодами. Препринт ИЯИ РАН № 1361/2013. М., 2013. 12 с.
- [3] <http://ketek.net/products/sipm/>
- [4] <http://sensl.com/products/silicon-photomultipliers/>
- [5] Рябов Ю.В., Грачев М.И., Каманин Д.В., Кузнецова Е.А., Кузнецов В.Л., Коптелов Э.А., Либанова О.Н., Литвин В.С., Матушко В.Н., Разин В.И., Садыков Р.А., Соболевский Н.М., Федченко В.А. // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 5. С. 957–961.