

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



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

Новый тип сцинтиляционных детекторов
тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF
и лавинных фотодиодах

препринт
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1401/2015
МАЙ 2015

МОСКВА 2015 MOSCOW

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



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

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

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1401/2015

МАЙ 2015

МОСКВА

2015

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences
60-th October Anniversary prospect 7a,
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
проспект 60-летия Октября, 7а
Москва, 117312

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

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

Описан высокоэффективный сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора ZnS(Ag)/LiF. В детекторе применен новый способ считывания света на основе пластикового световода и лавинных фотодиодов, позволяющий отказаться от оптических волокон и фотоумножителей. При регистрации событий использована схема совпадений сигналов с двух лавинных диодов, позволяющая исключить даже слабые шумы. Приведены дифракционные спектры поликристаллического порошка технического алмаза, полученных в результате тестовых измерений на импульсном источнике нейтронов «РАДЕКС» в ИЯИ РАН (сеанс дек.2014г.) с помощью данных детекторов.

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

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

Препринт 1401/2015

Май 2015

Подписано в печать 20.04.2015

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,0. Зак. 22351 Тираж 150 экз.

Бесплатно

Печать цифровая
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

ISBN 978-5-94274-288-1

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук, 2015
Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences, 2015

Введение

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 большая эффективность регистрации тепловых нейтронов (~60-90%), 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 съём светового сигнала.

Сцинтиллятор ZnS(Ag)/LiF, обладает чувствительностью к гамма-квантам на уровне 10^{-6} (по данным производителя), световыходом 160000 фотонов на нейтрон. Входящие в состав сцинтиллятора компоненты имеют резко различающие коэффициенты преломления — около 2.4 для кристалла ZnS и примерно 1.3 для LiF. Это обстоятельство затрудняет сбор света от сцинтилляций, и накладывает жесткое ограничение на максимально возможную толщину 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 съём светового сигнала посредством спектросмещающих оптических волокон [1]. Поскольку оптоволокно переизлучает всего лишь около 4% света, то для съёма 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 однофотонные события. Вместе с тем возникает риск подавления сигнала тепловыми шумами лавинного фотодиода (ЛФД-SiPM). Подавить шумы можно путем охлаждения фотодиодов, или посредством применения схемы временных совпадений. Последний способ не требует энергоемких охлаждающих элементов и поэтому был выбран при раз-

работке прототипа нового детектора. На рис 10. приведена таблица производимых сцинтилляционных экранов. В нашем случае используются сцинтилляционные экраны, имеющие эффективность регистрации нейтронов 28% и 42% и толщину 0.45 мм.

Разработка ИЯИ РАН позволила заменить оптоволокно на световод и фотомножитель на лавинный фотодиод (ЛФД-SiPM), при этом световыход детектора увеличился в 8 раз и составил эквивалентно 40 фотоэлектронам на один нейтрон. Схема измерительной установки [4] представлена на Рис 1.

Принцип измерений заключается в следующем. Нейтроны от источника ^{252}Cf замедляются в полиэтилене толщиной 7 см и захватываются в сцинтилляторе. Фотоны из ZnS/LiF попадают в световод и транспортируются к фотодиодам, где происходит преобразование светового сигнала в электрический. Сигналы с фотодиодов поступают в зарядо-чувствительные усилители и разветвляются. Часть сигнала поступает в зарядо-чувствительный АЦП (Lecroy 2248A), а другая часть поступает на вход дискриминатора с порогом 30 mV (около 6 фотоэлектрон). Схема совпадений генерирует строб 250 нс, в течение которого происходит частичное интегрирование аналогового сигнала в АЦП.

Основной задачей измерений является определение амплитуды сигнала с фотодетекторов, выраженной в количестве фотоэлектрон. Результаты измерений амплитуды сигнала с одного фотодиода представлены на Рис 2. Левый пик представляет случайные совпадения шумов двух фотодиодов с амплитудой >6 фотоэлектрон и с частотой <1 Гц.

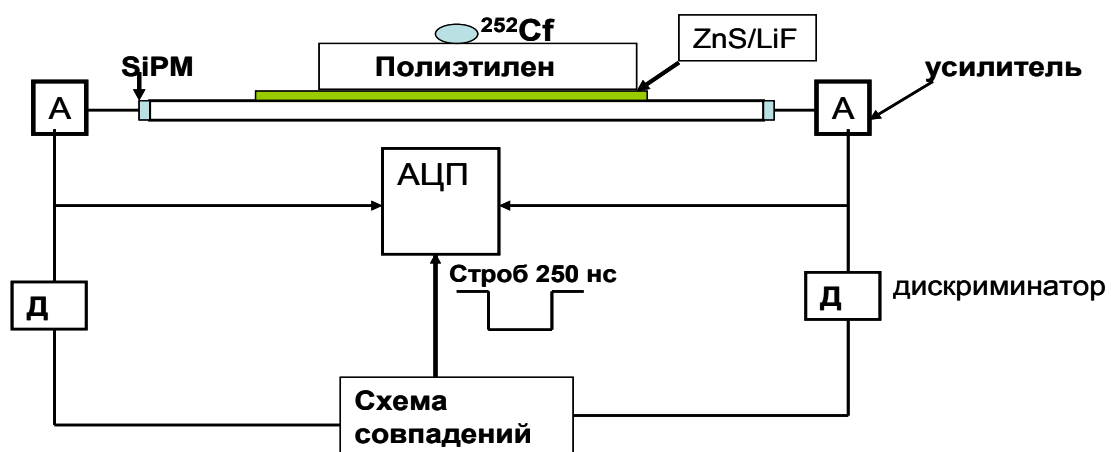


Рис 1. Схема измерительной установки для прототипа счетчика нейтронов на сцинтилляторе ZnS(Ag)/LiF

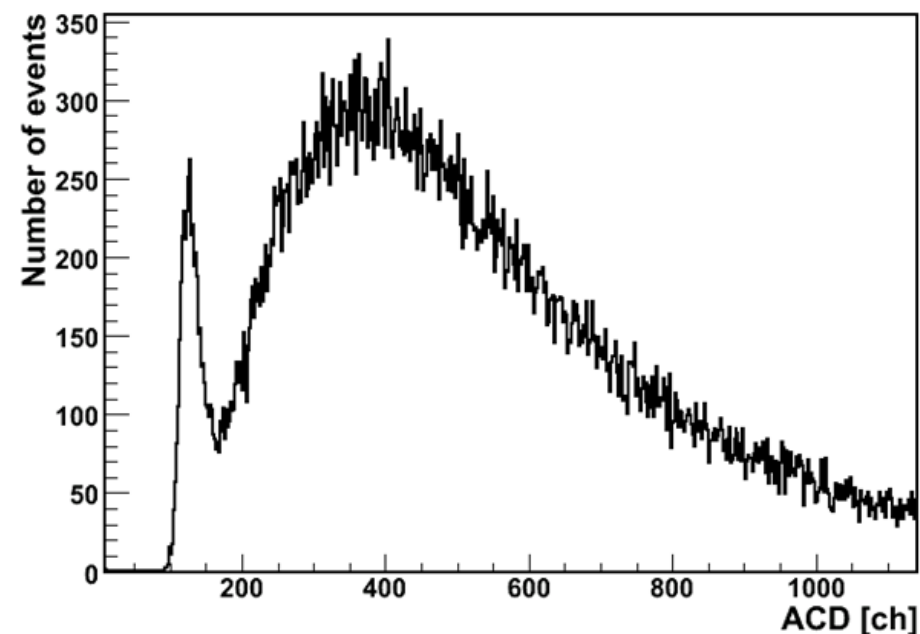


Рис 2. Приводится спектр амплитуд с сцинтиллятора ZnS/LiF. Спектр амплитуд от захвата нейтронов в одном фотодиоде. Правый пик от нейтронов соответствует 35–40 фотоэлектронам. Левый пик — случайные совпадения шумов двух фотодиодов с амплитудой >6 фотоэлектрон и с частотой <1 Гц.

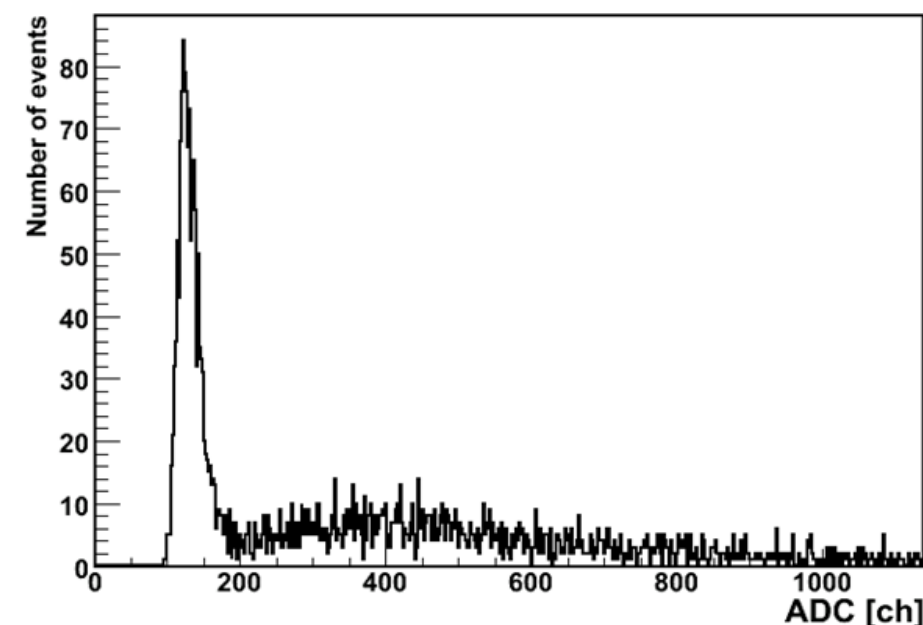


Рис 3. Приводится спектр амплитуд в случае, когда лист 1 мм кадмия помещается между детектором и замедлителем

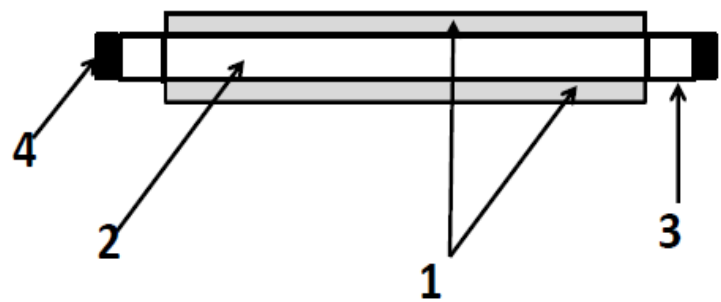


Рис 4. Схема детектора тепловых нейтронов.
1—сцинтиллятор ZnS(Ag)/Lif, 2—световод, 3—фокусирующая призма световода,
4—лавинный фотодиод

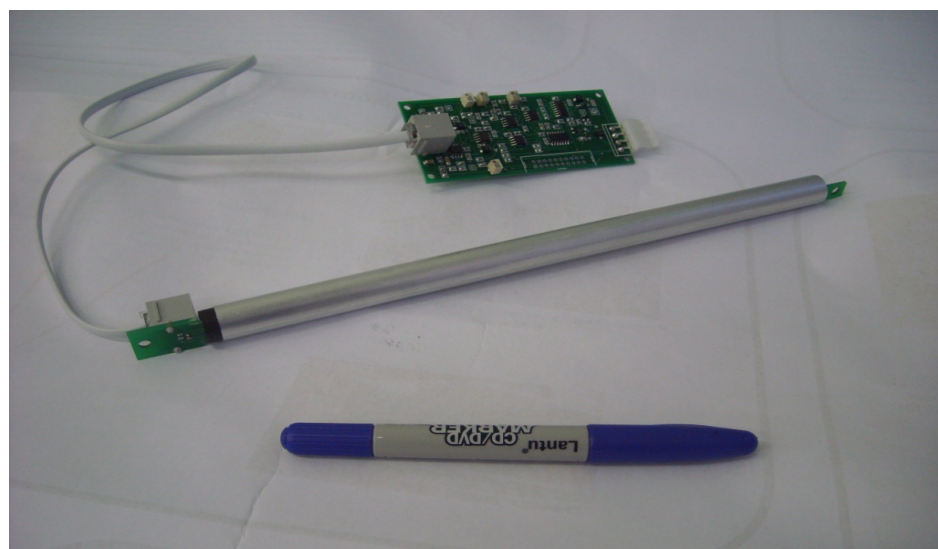
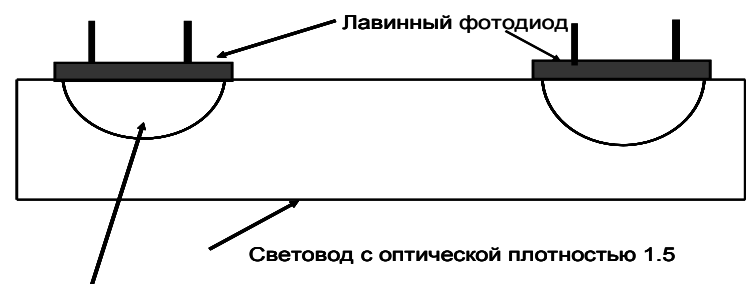


Рис 5. Фотография первого варианта счетчика нейтронов



сферическое углубление залито оптическим клеем с плотностью 1.6

Рис 6. Схема используемой технологии «рыбий глаз»

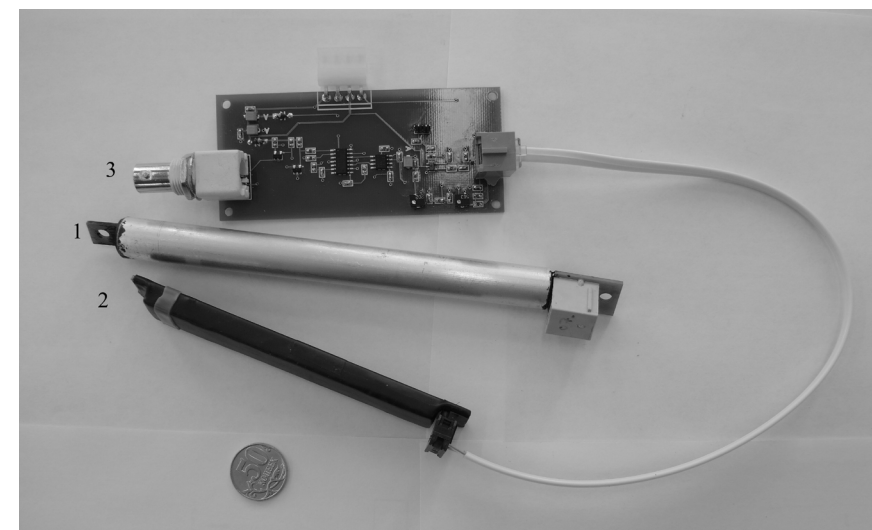


Рис. 7. Фотография первого(1) и второго(2) варианта сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов и усилителя формирователя(3)

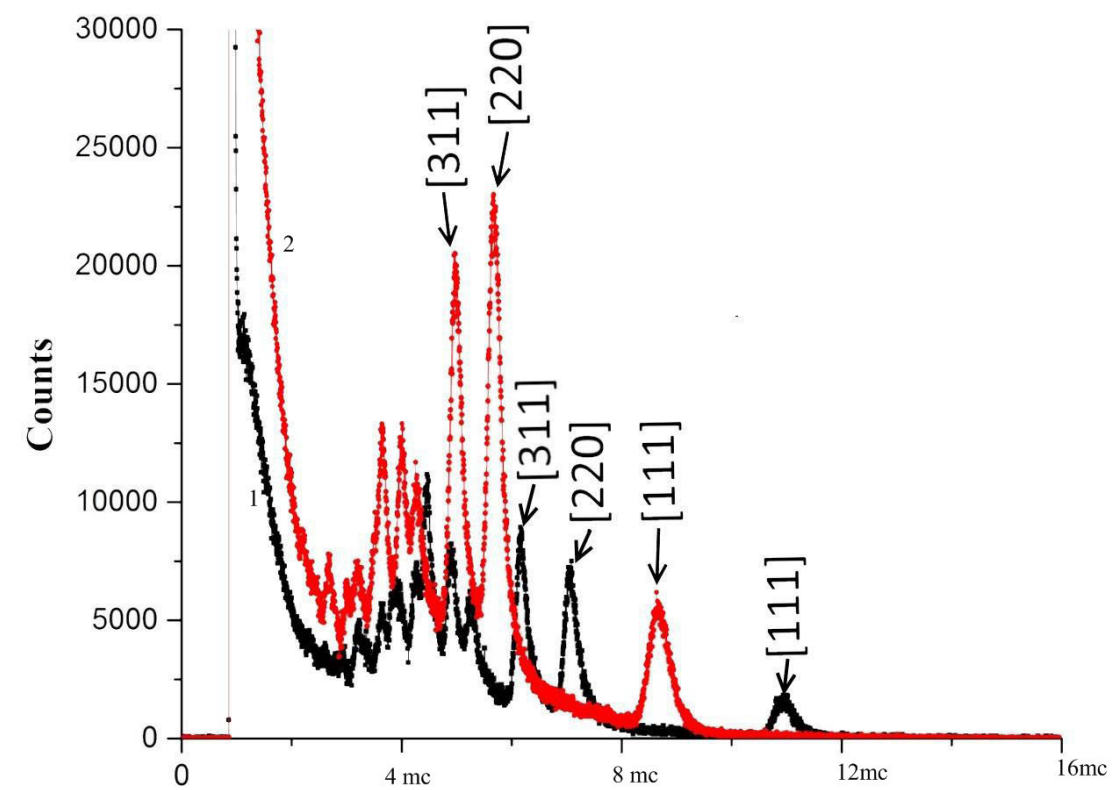


Рис. 8. Гистограмма (1) первого варианта счетчика нейтронов и гистограмма (2) второго варианта счетчика, установленного в секторах макета дифрактометра

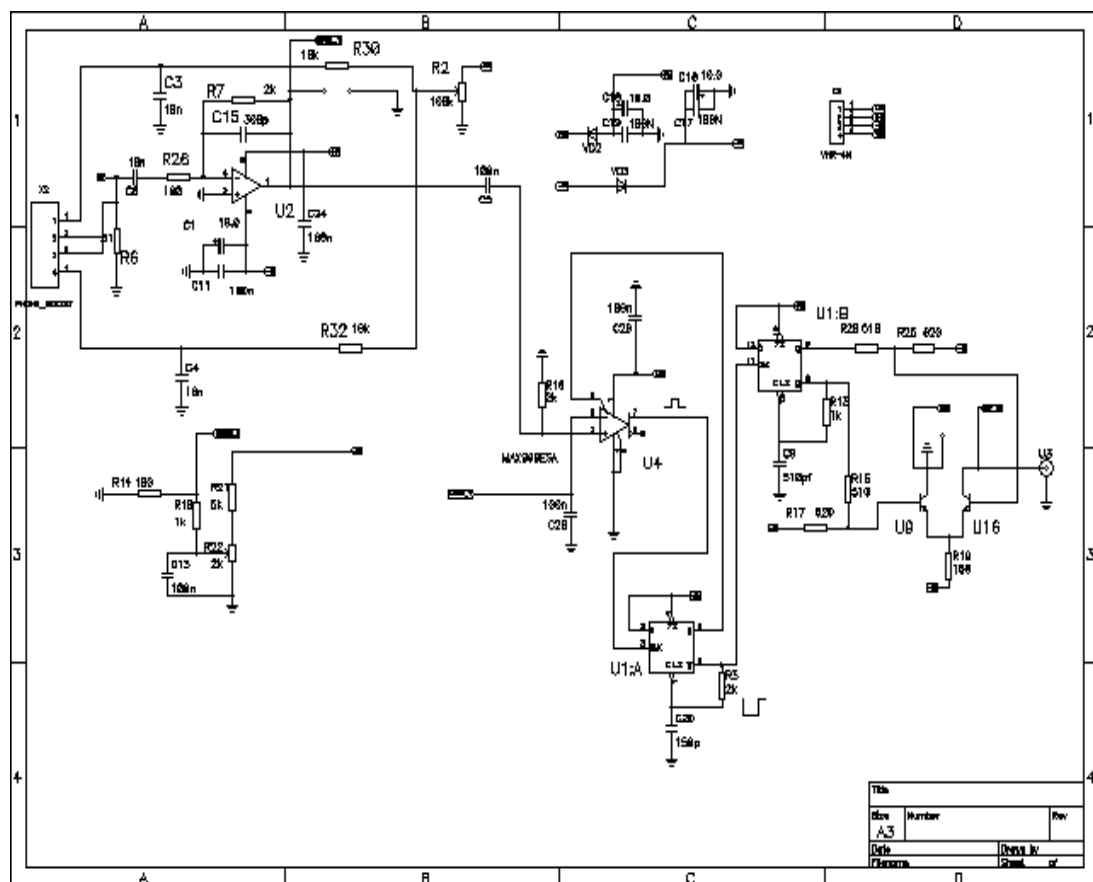


Рис 9. Принципиальная схема усилителя формирователя для детектора тепловых нейтронов

Table 2: Neutron capture Efficiency Table — for various AST ⁶Li based ND screens

Phosphor: LiF mix ratio by weight	⁶ Li isotope Estimated Atomic Volume Density	Scintillator Thickness	Estimated Thermal Neutron capture efficiency
(Ratio)	(atoms/cm ³)	(mm)	(%)
2:1	12.90 × 10	0.250	26
2:1	12.90 × 10	0.450	42
4:1	7.77 × 10	0.250	17
4:1	7.77 × 10	0.450	28
2:1 Dense (4x laminate)	18.40 × 10	0.900	79
2:1 Dense (5x laminate)	18.40 × 10	1.125	86

Рис 10. Таблица производимых сцинтилляционных экранов для регистрации нейтронов

Спектр амплитуд от захвата нейтронов в одном фотодиоде. Правый пик от нейтронов соответствует 35-40 фотоэлектронам. Левый пик — случайные совпадения шумов двух фотодиодов с амплитудой >6 фотоэлектронов и с частотой <1 Гц.

Правый пик в спектре соответствует сигналу от захвата нейтронов на уровне 35-40 фотоэлектронов. Как видно, такая большая амплитуда сигнала обеспечивает надежную регистрацию захвата нейтрона даже в случае высокого порога, равного 6 фотоэлектронам. Это подтверждает правильность выбора схемы сбора света от сцинтиллятора компактными фотодетекторами. Далее проводились измерения с целью определения кадмиевого числа. Между детектором и замедлителем помещался лист кадмия, толщиной 1 мм. Результат измерения приведен на Рис 3. Интенсивность нейтронов подавлена на порядок.

Конструкция детектора тепловых нейтронов

Схема первого варианта счетчика тепловых нейтронов приведена на Рис 4. Пластины сцинтилляторов ZnS(Ag)/LiF (с эффективностью 27%) расположены с двух сторон световода 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 фокусирующие призмы, 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 10x100 мм². Усиление сигнала производится зарядочувствительными усилителями со временем интегрирования 1 мкс, что соответствует времени высвечивания ZnS. Благодаря большому времени интегрирования, усилители являются помехоустойчивыми.

Принцип работы детектора

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 происходит усиление, проверка на совпадение сигналов от двух лавинных фотодиодов, и через выходной формирователь сигнал в формате NIM поступает в систему регистрации.

Параметры детектора

1. Эффективность регистрации нейтронов — не хуже 50%.
2. Максимальная интегральная нагрузка — не ниже $10^5/c$.
3. Временное разрешение — не хуже 1 мкс.

На Рис 5. приведена фотография первого варианта детектора тепловых нейтронов и усилителя формирователя.

Одним из способов увеличения эффективности детектора является использование сцинтиллятора 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 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.

2. Применение технологии «рыбий глаз» (использование оптической линзы) при работе с плоским световодом. Таким образом, удалось увеличить световыход до 150 фотоэлектронов. Принцип технологии «рыбий глаз» показан на Рис. 6. Таким образом, применяя более эффективный сцинтиллятор с увеличенным содержанием LIF до 42%, и технологию увеличения светосбора позволили получить счетчик тепловых нейтронов с эффективностью 70%. Этот счетчик полностью заменяет собой гелиевый счетчик высокого давления по эффективности. Конструкция счетчика так же изменилась. Были изготовлены детекторы размером 15x100 мм как с эффективностью 49%, так и с эффективностью и 70%.

На Рис 7. приведена фотография первого и второго варианта детекторов тепловых нейтронов и усилителя формирователя. Выгодной особенностью является компактность и легкость, не требуются громоздкие источники высоковольтного напряжения.

В данных детекторах применяются лавинные фотодиоды фирмы «Sensl» тип

S [3] Особенностью этих фотодиодов является линейная зависимость теплового шума от перенапряжения на фотодиоде. Следовательно, детекторы не требуют точной индивидуальной настройки по шумам. Детекторы, как первого варианта, использующие фоконны и лавинные фотодиоды фирмы «КЕТЕК»[2], так и второго варианта, выполненные по технологии «рыбий глаз» и фотодиодами фирмы «SENSL» были протестированы на импульсном источнике нейтронов «РАДЕКС» ИЯИ РАН [5]. Детекторы были установлены в детектирующие блоки макета дифрактометра. На рис. 8 приведены времяпролетные спектры или дифрактограммы, полученные со сцинтилляционных счетчиков различных конструкций. В качестве образца был выбран порошок технического алмаза. На данных спектрах четко различимы пики Брэгга с индексами [111], [220], [311]. Хорошо видно, что счетчики расположены под разными углами имеют большую эффективность регистрации нейтронов.

На Рис 9. приведена принципиальная схема усилителя формирователя для детектора тепловых нейтронов.

Счетчик содержит два лавинных фотодиода соединенных параллельно. Такое соединение выполняет две функции:

- А. Схему совпадения для полезного сигнала.
- Б. Увеличивает соотношение сигнал шум в 1.4 раза.

Сигнал с выходов диодов поступает на зарядо-чувствительный усилитель на микросхеме U2

И после усиления поступает на компаратор на микросхеме U4. При превышении сигналом порога компаратора компаратор запускает одновибратор на микросхеме U1-A. Сигнал с выхода одновибратора блокирует компаратор на время 1.5мкс и одновременно запускает формирователь выходного импульса на микросхеме U1-B. Сформированный сигнал, длительностью 150нс через каскад на транзисторах U9, U16 поступает на разъем BNC144. Напряжение смещения лавинных диодов устанавливается резистором R2.

Заключение

Особенность данных детекторов нейтронов является:

1. Отсутствует необходимость точного подбора напряжения смещения лавинных фотодиодов.
2. Отсутствие теплового шума детектора нейтронов при температуре окружающей среды до +27°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 ИЯИ РАН «РАДЕКС» [5] показали, что разработанные сцинтилляционные детекторы вполне могут заменить классические гелиевые детекторы высокого давления. Помехоустойчивая, компактная и недорогая электроника. Детекторы не требуют индивидуальной настройки усилителей. Отсутствие высоковольтного питания и применения фотомножителей, делает применение данных детекторов очень 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 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] <http://ketek.net/products/sipm/>
- [3] <http://sensl.com/products/silicon-photomultipliers/>
- [4] 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.
- [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. // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 5. С. 957-961.