

УДК 621.386.8

ДЕТЕКТОР ПОТОКОВ ЖЁСТКИХ ГАММА-КВАНТОВ С МИНИМИЗИРОВАННЫМ ШУМОМ ИЗОБРАЖЕНИЯ И УВЕЛИЧЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ РЕГИСТРАЦИИ

© С. С. Афанасенко¹, Р. Р. Ахметшин^{1,2}, Д. Н. Григорьев^{1,2,3},
В. Ф. Казанин^{1,2}, В. В. Поросев¹, А. В. Тимофеев¹, Р. И. Щербаков¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: A.V.Timofeev@inp.nsk.su

Изложены проблемы, связанные с рентгенографией объектов из стали толщиной 100 мм и более. В классическом методе съёма информации полупроводниковые фотоприёмники располагаются непосредственно на сцинтилляторах. В результате рассеянное в сцинтилляторе гамма-излучение попадает в фотоприёмник, что определяет шум изображения и оказывает негативное воздействие на электронику чтения. Предложен метод построения системы регистрации с использованием спектросмещающего волокна без недостатков классического метода. Данный метод позволяет получить шум изображения меньше, чем классический, вывести электронику из-под воздействия гамма-излучения и увеличить эффективность регистрации. Экспериментально изучены различные способы реализации предложенного метода съёма сигналов и выбраны оптимальные. На основе проведённых исследований разработана конструкция регистрирующего элемента и приведены результаты измерения его параметров.

Ключевые слова: сцинтилляторы, спектросмещающее волокно, рентгенография.

DOI: 10.15372/AUT20210209

Введение. Рентгенография объектов с высоким атомным номером и большой толщиной необходима для неразрушающего контроля за исполнением сварочных и сборочных работ при изготовлении массивных конструкций, таких как мосты, объекты нефте- и газоиндустрии [1]. Для этого требуется просвечивать объекты с толщиной стали от 100 мм и более. В последнее время важной задачей стало предотвращение незаконного оборота взрывчатых и наркотических веществ, для чего необходимо обеспечить досмотр автомобильных фур, железнодорожных и морских контейнеров и других крупнотоннажных объектов [2]. Требование на просвечивающую способность для решения этой задачи примерно то же, что и для неразрушающего контроля, но возникает дополнительное условие на выделение объектов с малым атомным номером [3].

Для решения этих задач используются ускорители электронов с энергией до 10 МэВ. Невысокая энергия электронов позволяет избежать интенсивных потоков нейтронов. Гамма-кванты с энергией несколько мегаэлектронвольт образуются в результате тормозного излучения высокоэнергетичных электронов в мишени с высоким атомным номером [4]. Для выделения взрывчатых и наркотических веществ просвечивание исследуемых объектов проводится при двух энергиях ускорителя электронов, различающихся примерно в 2 раза [5]. Использование двух энергий позволяет разделять вещества по атомному номеру

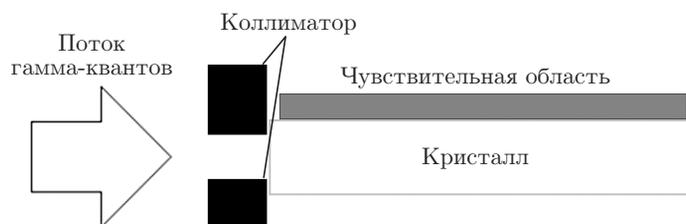


Рис. 1. Схематичное изображение классического метода построения детектора

на основе зависимости пробега гамма-квантов от атомного номера и энергии. В результате удастся выделить объёмные объекты с малыми плотностями и атомными номерами на фоне тяжёлых конструкций, например стенок контейнеров, деталей фур и т. д.

При рентгенографии объектов большой толщины с высоким атомным номером в качестве детектора гамма-квантов широко используются многоэлементные экраны из тяжёлых сцинтилляционных кристаллов. Наиболее распространённым решением является применение сцинтилляционных кристаллов ортогерманата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) и вольфраматов кадмия CdWO_4 (CWO) или цинка ZnWO_4 (ZWO) [6]. Как правило, световой сигнал регистрируется фотоприёмниками на основе PIN-фотодиодов, обеспечивающими требуемый большой динамический диапазон [7] и имеющими невысокую цену. Лавинные фотодиоды также располагают достаточным динамическим диапазоном, но они в разы дороже. Популярными в последнее время кремниевые фотоумножители не обладают требуемым динамическим диапазоном. Недостатком PIN-фотодиодов является отсутствие усиления. Поэтому электроника вынужденно располагается в непосредственной близости для обеспечения требуемого соотношения сигнал/шум.

Как компромисс между эффективностью регистрации и координатным разрешением сцинтилляционные кристаллы имеют сильно вытянутую форму с длиной несколько десятков миллиметров и поперечными размерами несколько миллиметров. При такой геометрии эффективность сбора света на торец кристалла мала и сильно зависит от продольной координаты. Поэтому фотоприёмники устанавливаются на боковой поверхности. Перед сцинтилляционными кристаллами располагается щелевой коллиматор, прикрывающий кристаллы от рассеянного в исследуемом объекте излучения и фотоприёмники от прямого воздействия потока гамма-квантов. Классический метод построения детектора показан на рис. 1. Но при этом фотоприёмники и электроника подвержены неизбежному воздействию рассеянных в сцинтилляционных кристаллах гамма-квантов, значительная доля которых при характерных энергиях гамма-квантов несколько мегаэлектронвольт попадает на фотодиод. Энергия образования электрон-дырочной пары в кремнии 3,66 эВ [8] в несколько сотен раз меньше энерговыделения в сцинтилляторе, необходимого для образования одной электрон-дырочной пары в фотоприёмнике. Поэтому даже при относительно небольшой вероятности взаимодействия в кремнии на выходе фотодиода возникают сигналы с большими флуктуациями, которые обычно вносят определяющий вклад в шум регистрируемого изображения. Для оценки влияния рассеянного излучения было проведено моделирование методом Монте-Карло на основе пакета GEANT [9]. В моделировании использовалось измеренное соотношение откликов от взаимодействия одного гамма-кванта в PIN-фотодиоде и в кристалле BGO (отклик регистрируется PIN-фотодиодом), равное 250. Как видно на рис. 2, шум изображения определяется взаимодействием в фотодиодах. Кроме того, из-за негативного воздействия излучения на электронику уменьшается срок её службы.

Альтернативным методом является использование волоконно-оптических линий для передачи сцинтилляционного света от кристаллов на фотоприёмники. В данном случае

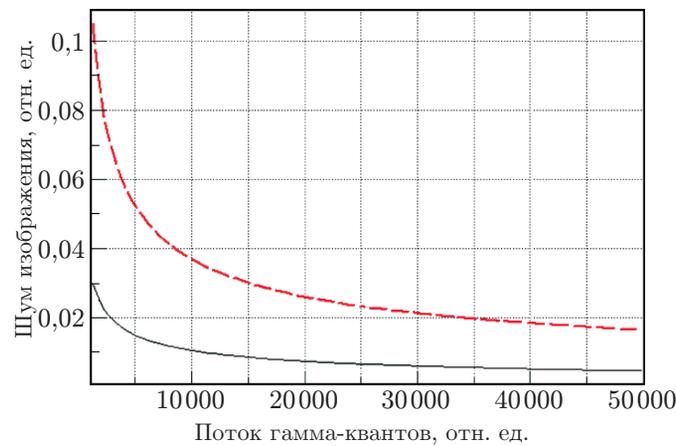


Рис. 2. Зависимость шума изображения от потока гамма-квантов (сплошная кривая — без учёта взаимодействия рассеянных частиц с фотодиодом, штриховая — с учётом взаимодействия)

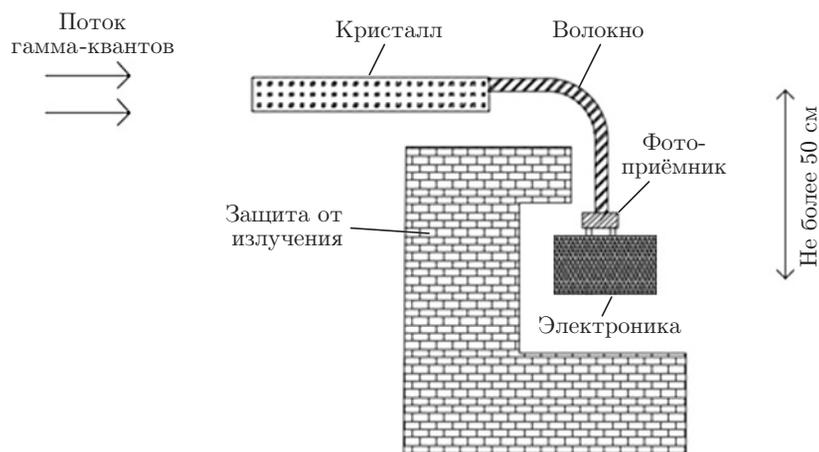


Рис. 3. Схема вывода фотоприёмника из области пучка

фотоприёмники и электроника выводятся из-под воздействия гамма-излучения (рис. 3) и статистический шум изображения может быть равен его теоретическому пределу. Однако при этом из-за конечной числовой апертуры транспортировки света по оптическому волокну происходит неизбежная потеря около 90–95 % светового сигнала. Это значительно ужесточает требования ко всем элементам тракта транспортировки света от сцинтиллятора к фотоприёмнику. Но если обеспечивается условие возникновения на один сигнальный гамма-квант в фотоприёмнике более 2 пар носителей, то статистический шум изображения определяется падающим потоком гамма-квантов и не зависит от потерь светового сигнала. Поэтому при разработке косвенного съёма сигнала необходимо выполнить это требование.

1. Разработка альтернативного метода съёма сигнала. Наиболее простой реализацией альтернативного метода съёма сигнала является присоединение к выходному торцу кристалла волоконно-оптической линии связи. Данное решение рассматривалось в ряде работ [10, 11]. Но это вызывает технологическую проблему в виде взаимоисключающих требований. Для обеспечения перехода света все поверхности должны быть полированными, а для надёжности склейки, наоборот, максимально шероховатыми. Оптимальной схемой передачи сигнала является использование спектрсмещающих волокон. Такое

волокно укладывается вдоль сцинтилляционного кристалла. Сцинтилляционный свет поглощается в спектросмещающем волокне и переизлучается изотропно на большей длине волны. В таком решении локальные дефекты оптического сопряжения не приводят к заметному уменьшению сигнала. Если фотон переизлучается вдоль оси волокна в конусе с углом меньше угла полного внутреннего отражения, то он захватывается волокном, иначе вылетает из волокна и теряется. Эффективность захвата для двухслойного волокна круглого сечения составляет 5,4 % [12].

Данный метод широко используется для создания детекторов на основе органических сцинтилляторов [13, 14]. В этих работах спектросмещающее волокно сопрягалось с пластическим сцинтиллятором, имеющим близкий показатель преломления и схожие механические свойства. В таком случае надо было решить существенно более сложную задачу и обеспечить совместную работу спектросмещающих волокон с кристаллами тяжёлых сцинтилляторов, которые имеют аномально большой показатель преломления (>2) и по своим механическим свойствам (плотность, коэффициент теплового расширения и т. д.) значительно отличаются от полимеров.

В представленной работе рассмотрена возможность косвенного съёма сигнала с тяжёлых сцинтилляторов. В качестве тяжёлого сцинтиллятора был выбран кристалл BGO, так как он производится в России и является одним из самых плотных сцинтилляторов, а также имеет световой выход на уровне 6000–10000 фотонов/МэВ. Вольфраматы имеют большие плотность и световой выход, но из-за наличия плоскостей спайности в их кристаллической структуре существенно усложняется механическая обработка: выборка канавок приводит к сколам боковых стенок и значительно уменьшает выход годных кристаллов.

2. Оптимизация сбора света.

2.1. Расположение спектросмещающего волокна относительно кристалла. Существует два способа расположения волокна относительно кристалла. Наиболее простой способ — расположение волокна на одной из граней кристалла. Основной недостаток этого способа — невозможность укладки кристаллов более чем в два ряда с минимальным зазором. Для его устранения используется другой способ: в кристалле прорезают канавку под размеры волокна. Кроме того, канавка может приводить к увеличению светосбора.

Для изучения этого эффекта был использован кристалл BGO размерами $6 \times 6 \times 30$ мм с расположением спектросмещающих волокон Y-11(100) MSJ диаметром 1 мм [12], как показано на рис. 4. Кристалл облучался рентгеновским излучением, и свет, выходящий с торцов волокон, регистрировался ПЗС-матрицей. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Расположение спектросмещающего волокна в канавке увеличивает светосбор примерно на 20 %, добавление оптической смазки или клея в канавку приводит к увеличению сигнала ещё на 20 %. С учётом уменьшения области регистрации гамма-квантов из-за наличия канавки увеличение сигнала составляет около 30 %.

2.2. Наличие одной и двух канавок. Теоретически при наличии двух канавок и двух спектросмещающих волокон на одном кристалле суммарный сигнал может увеличиться

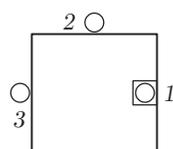


Рис. 4. Способы расположения спектросмещающих волокон 1, 2, 3 относительно сцинтиллятора (вид с торца)

Таблица 1

Сигналы из спектросмещающего волокна в зависимости от его расположения

Расположение спектросмещающего волокна (см. рис. 4)	Среднее значение сигнала, каналы АЦП	Относительное среднее значение сигнала
В канавке (1)	1972	1
У боковой грани (2)	1600	0,81
У противоположной грани (3)	1668	0,85

Таблица 2

Сравнение сигналов из кристаллов с одной и двумя канавками

Тип кристалла	Наличие смазки	Относительное среднее значение сигнала с кристалла
BGO (2 канавки)	да	1,40
BGO (1 канавка)	да	1,00
BGO (2 канавки)	нет	1,32
BGO (1 канавка)	нет	0,83

примерно в 2 раза. Но свет, переизлучённый одним волокном, не переизлучается другим, поэтому на практике увеличение сигнала меньше [15].

Этот эффект также исследовался. Использовались кристаллы BGO с одной и двумя канавками. В табл. 2 приведены значения сигналов из кристаллов, усреднённые по нескольким измерениям. В случае кристалла с двумя канавками суммарный сигнал на 40–60% больше, чем в случае кристалла с одной канавкой.

Как следует из табл. 2, использование кристалла BGO с двумя канавками и двумя спектросмещающими волокнами даёт выигрыш сигнала примерно в 1,5 раза. Однако это приведёт к увеличению площади фотоприёмника и соответственно росту его шумов. Поэтому отношение сигнал/шум улучшится незначительно при существенном увеличении сложности и стоимости системы. В связи с этим использование двух волокон нецелесообразно.

Также следует отметить, что при отсутствии оптической смазки или клея между кристаллом и спектросмещающим волокном сигнал уменьшается не более чем на 20 %, а значит, вклад дефектов вклейки спектросмещающего волокна в канавку будет незначительным.

2.3. Измерение зависимости светового сбора от длины кристаллов. Известен эффект зависимости светового сбора от точки высвечивания света в сцинтилляторе, который проявляется в методе прямого съёма и ограничивает длину сцинтиллятора величиной 20–30 мм. Данный эффект исследовался в методе косвенного съёма. Проверялась зависимость светового сбора от точки высвечивания сцинтиллятора. Для кристаллов с длинами 30, 40, 50 и 60 мм проведены измерения зависимости сигнала от места засветки кристалла УФ-лазером. Кристаллы в целях увеличения светового сбора оборачивались в слой тефлоновой ленты и алюминиевой фольги. В боковой поверхности этого покрытия были сделаны отверстия с шагом 5 мм вдоль длины кристалла. Зависимости светосбора от точки засветки не обнаружено.

Для дополнительного подтверждения сравнены сигналы от кристаллов разной длины. Все измерения проводились с одним спектросмещающим волокном для исключения эффекта индивидуального различия волокон. В боковой поверхности покрытия кристалла было сделано одно отверстие для лазерного луча (посередине боковой стороны кристалла).

Таблица 3

Результаты измерений зависимости сигналов от длины кристаллов

Длина кристалла, мм	Среднее по трём кристаллам, каналы АЦП
60	790 ± 11
50	794 ± 7
40	793 ± 9
30	790 ± 8

Результаты измерений приведены в табл. 3. Для уменьшения ошибок было проведено усреднение сигналов по всем трём кристаллам одной длины.

Из результатов измерений видно, что при использовании косвенного съёма сигнала отсутствует зависимость величины светового сигнала от длины кристаллов. Это позволяет повысить чувствительность и улучшить энергетическое разрешение по сравнению с традиционным методом за счёт роста длины кристаллов. Например, увеличение длины кристаллов с 30 до 50 мм повысит эффективность поглощения гамма-квантов на 40 % и уменьшит шум изображения на 20 %. Следует отметить, что моделирование с различной длиной кристаллов в пакете GEANT [9] хорошо согласуется с данными от Saint-Gobain crystal [16] и базы данных NIST [17].

3. Исследования параметров регистрирующих элементов с косвенным съёмом сигнала.

3.1. Сравнение светимости спектросмещающего волокна со сцинтилляционным волокном под рентгеновским излучением. Необходимо заметить, что волокно может регистрировать рентгеновское излучение и этим вносить вклад в шум изображения аналогично взаимодействию в кремнии. Для определения этого вклада сигнал со спектросмещающего волокна сравнивается с сигналом в сцинтилляционном волокне такого же диаметра.

Набор волокон производства Kuragau CO., LTD и сцинтилляционное волокно Vicron BC-408 одинаковой длины облучались рентгеновским излучением. Торцы были полированы, и световой сигнал, исходящий с торцов волокна, регистрировался ПЗС-матрицей ICX-084AL. Световой сигнал измерялся в условных единицах. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Светимость волокон под рентгеновским излучением

Волокно	Сигнал, у. е.
Clear PSM	<2
O-2 (100) MSJ	33
Y-8 (100) SJ	59
Y-8 (100) MSJ	79
Y-8 (150) SJ	82
Y-8 (250) SJ	107
Y-11 (100) MSJ	123
Сцинтиллятор Vicron BC-408	738 (1054)*

*Значение в скобках — сигнал с учётом поправки на спектральную чувствительность, так как используемый в сравнении сцинтиллятор Vicron BC-408 имеет длину волны высвечивания примерно 430 нм, которая короче максимума спектральной чувствительности ПЗС [18]. Для спектросмещающих волокон поправка на спектральную чувствительность ПЗС-матрицы не производилась, поскольку в их области спектра излучения её величина близка к максимальной.

Таблица 5

Сравнение методов съёма световых сигналов

Метод	Интенсивность сигнала, у. е./мм ²	Полный сигнал, у. е.	Относительный полный сигнал
Прямой съём	760	27360	1,0
Косвенный съём	3480	2714	0,10 (0,05)*

*Значение в скобках — относительный полный сигнал с торца волокна с учётом угловых распределений для кристалла и волокна. Считалось, что свет, выходящий из кристалла и волокна, распределяется по полярному углу подобно ламбертовскому источнику света [19], но в случае волокна максимальный угол ограничен числовой апертурой. Также считалось, что фотоприёмник полностью закрывает торец кристалла. В реальных конструкциях характерная доля покрытия торца кристалла фотоприёмником 50 %, следовательно, сигнал тоже в 2 раза меньше.

Как следует из табл. 4, спектросмещающее волокно переизлучает рентгеновское излучение в 10–30 раз менее интенсивно (зависит от типа волокна), чем пластиковый сцинтиллятор. Даже при одинаковой эффективности регистрации рентгеновского излучения в спектросмещающем волокне и сцинтилляторе вклад в шум изображения от взаимодействия в волокне будет меньше статистического шума взаимодействия в сцинтилляционных кристаллах. Так как для выбранных спектросмещающих волокон прямое взаимодействие в них на порядок меньше, чем в сцинтилляторе, то искажения сигналов от этого эффекта будут пренебрежимо малы.

3.2. Сравнение величин сигналов в методах прямого и косвенного съёмов сигнала. Для сравнения величин сигнала при прямом и косвенном съёмах использовалась методика с применением ПЗС-камеры, описанная в разд. 3.1. Для получения полного сигнала измеренная интенсивность светового сигнала умножалась на площадь излучающей поверхности. В случае прямого съёма это — торец кристалла, а в случае косвенного съёма — выведенный из кристалла торец спектросмещающего волокна.

Кристаллы облучались одновременно рентгеновским излучением, сигналы регистрировались ПЗС-матрицей. Результаты представлены в табл. 5. Видно, что сигнал, полученный методом косвенного съёма, на порядок меньше сигнала, получаемого методом прямого съёма.

3.3. Предложенная конструкция. На основе проделанной работы по оптимизации сбора света для измерения светового выхода в качестве регистрирующего элемента выбраны кристаллы ВГО размерами 3,8 × 3,7 × 30 мм. Посередине грани шириной 3,8 мм по всей длине кристалла прорезана канавка с поперечными размерами 1,1 × 1,1 мм для клейки спектросмещающего волокна (рис. 5). Для увеличения светового выхода кристалл после вклеивания спектросмещающего волокна оборачивается в один слой специального светоотражающего тефлона толщиной не более 80 мкм [20], а для светоизоляции — в один слой алюминиевой фольги толщиной не более 20 мкм. В целях улучшения оптических свойств обёртки и фиксации спектросмещающего волокна осуществляется нахлест по одной стороне, а для механических свойств нахлест производится на стороне с канавкой. Таким образом, поперечный размер упакованного кристалла составляет 4 × 4 × 30 мм, а толщина покрытия не превышает 0,1 мм с учётом клея на сторонах без нахлёста и 0,2 мм на стороне с нахлёстом.

Для эксперимента было выбрано спектросмещающее волокно Kuraray O-2(100) MSJ диаметром 1 мм. Спектр поглощения данного волокна лучше всего согласуется со спектром высвечивания ВГО. Существенным недостатком такого волокна является малая длина затухания (1,5 м), поэтому использовались образцы длиной 130 мм.

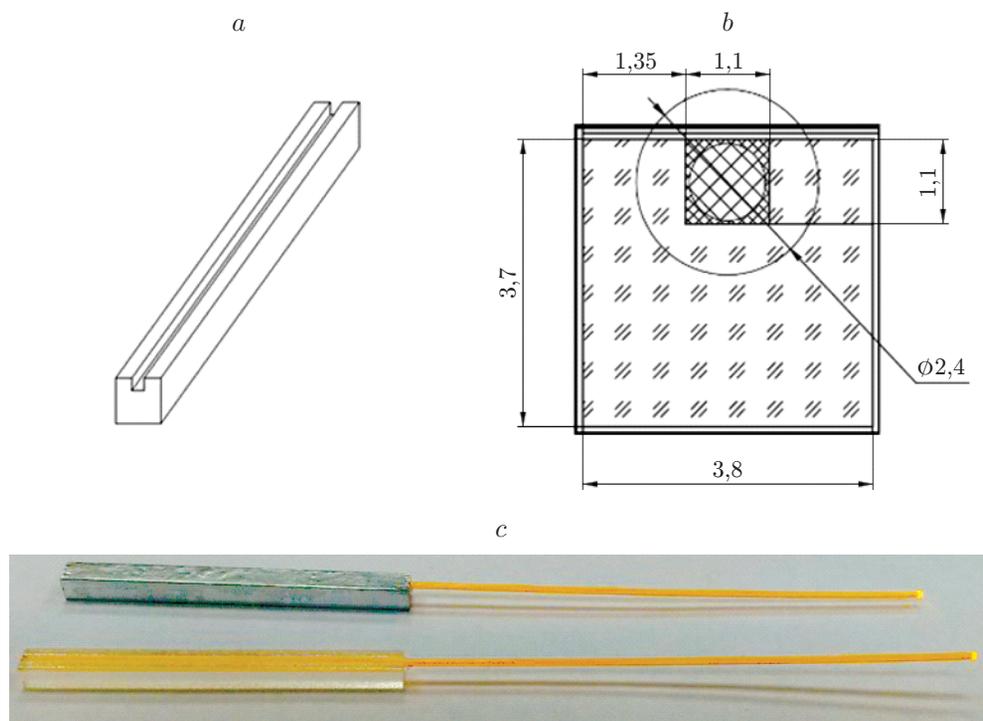


Рис. 5. Регистрирующий элемент детектора: *a* — вид кристалла с прорезанной в нём канавкой под спектросмещающее волокно, *b* — сечение кристалла в обёртке, *c* — фотография кристалла с вклеенным спектросмещающим волокном

Для увеличения сигнала на дальний торец волокна принято наносить алюминиевое зеркальное покрытие [21]. Поэтому для изучения данного эффекта световой выход измерялся для спектросмещающих волокон с различными методами напыления зеркала. Для части волокон зеркало напылялось магнетронным методом. Алюминий напылялся на торец и боковую сторону на 2 мм для лучшего удержания зеркала. Ещё часть напылялась электронно-лучевым методом (алюминий напылялся только на торец волокна).

3.4. Методика проведения измерения светового выхода. Кристалл ВГО облучался гамма-квантами с энергией 662 КэВ от радиоактивного источника ^{137}Cs . В качестве фотоприёмника использовался кремниевый фотоумножитель S13360-3050CS [22] с размерами чувствительной области 3×3 мм и размером ячейки 50 мкм. Спектральная чувствительность фотоприёмника составляет 30 % при длине волны 580 нм. Сигналы с кремниевого фотоумножителя регистрировались анализатором импульсов DT5720 [23] и обрабатывались специализированным программным обеспечением. Калибровка шкалы АЦП в электронах производилась по шумовым спектрам [24]. Сигнал от одного фотоэлектрона соответствует 509 ± 1 канал АЦП.

3.5. Результаты измерений. В целях измерения светового выхода были взяты четыре образца кристалла со спектросмещающим волокном по описанной в разд. 3.4 методике. Набирался спектр событий от источника гамма-квантов, пик подгонялся функцией Гаусса (рис. 6). Зарегистрированный сигнал составил $29,0 \pm 0,4$ электрона и $31,3 \pm 1,1$ электрона для волокон с напылением зеркала магнетронным и электронно-лучевым методами соответственно. Разброс сигналов лежит в пределах случайной ошибки. Различие сигналов согласуется с различной эффективной длиной спектросмещающего волокна в кристалле 28 и 30 мм соответственно (длина боковой цилиндрической поверхности, на которой не было нанесено зеркального напыления).

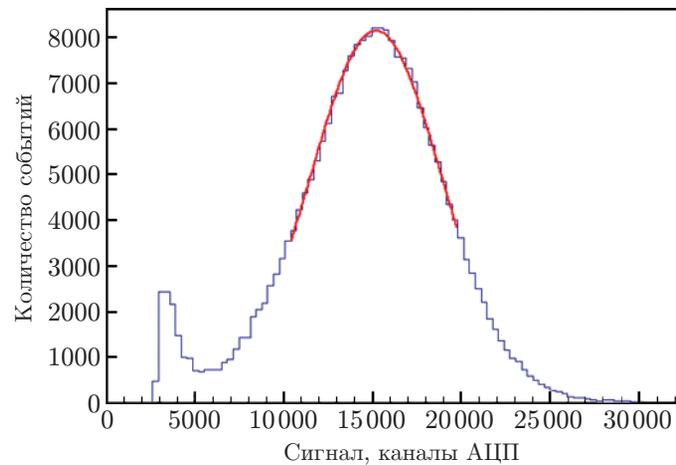


Рис. 6. Спектр событий от источника ^{137}Cs (синяя кривая — спектр события источника, красная кривая — функция Гаусса)

Из вышеуказанных результатов следует, что на 1 МэВ поглощённой энергии приходится сигнал 45 ± 2 фотоэлектрона. При использовании PIN-фотодиодов, у которых квантовая чувствительность более чем в 2 раза выше, сигнал будет достигать величины не менее 90 фотоэлектронов на 1 МэВ поглощённой энергии.

4. Дальнейшее развитие методики. Рассмотренный способ косвенного съёма сигнала позволяет вывести фотоприёмники и электронику из-под воздействия облучения. Однако спектросмещающие волокна имеют малую длину поглощения порядка 1–4 м, поэтому аппаратура не может быть расположена далеко от кристаллов, что требует создания сложной системы защиты и очень компактной инфраструктуры. Транспортное волокно обладает большой прозрачностью (длина поглощения более 10 м), а оптические соединения волокон имеют потери около 10 % [25]. Таким образом, использование транспортного волокна и оптических разъёмов между спектросмещающим волокном и фотоприёмником даёт возможность удалить аппаратуру от места облучения на метровые расстояния и снять требования на радиационную защиту. Это значительно упростит инфраструктуру, сборку и разборку детектора, а также замену составных частей в случае дефектов.

Ввиду того что данный метод не вносит изменений в габариты разрешающего элемента, можно разрабатывать двухкоординатные системы любых габаритов, что позволит уменьшить дозу на объект и время сканирования.

Заключение. Разработан метод косвенного съёма сигнала из тяжёлых сцинтилляторов с помощью спектросмещающего волокна и предложена конструкция регистрирующего элемента. Экспериментально доказано отсутствие эффекта неоднородности светового сбора по длине кристалла, что снимает ограничение на его длину. Измеренная величина сигнала в фотоприёмнике составила 45 фотоэлектронов на 1 МэВ энерговыделения в регистрирующем элементе. Этот сигнал не будет влиять на статистику гамма-квантов в изображении. Таким образом, при формировании жёстким гамма-излучением рентгенографических изображений увеличивается эффективность регистрации и минимизируется шум изображения. Кроме того, регистрирующая аппаратура выводится из-под негативного влияния жёсткого излучения. При необходимости можно отнести регистрирующую аппаратуру на расстояние до нескольких метров, но для этого надо осуществить переход со спектросмещающего волокна на транспортное.

Благодарности. Авторы выражают благодарность компании Kuraray Co., LTD (Methacrylic Resin Division, Scintillation Materials) за предоставленные образцы спектросмещающего волокна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lin Y.** Applications of low energy linacs in China // Proc. of the 21-st Intern. Conference (LINAC 2002). Gyeongju, Korea, 19–23 Aug., 2002. P. 279–283.
2. **Ямный К. О., Ямный В. Е., Цымбал В. С.** Система интроскопии крупногабаритных объектов с применением бетатрона // Вестн. БГУ. 2015. Сер. 1. № 3. С. 66–72.
3. **Ogorodnikov S., Petrunin V.** Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition // Phys. Rev. Special Topics — Accelerators and Beams. 2002. **5**, Iss. 10. P. 104701. DOI:10.1103/PHYSREVSTAB.5.104701.
4. **Tang Ch., Chen H., Liu Y., Wang X.** Low-energy linacs and their applications in Tsinghua university // Proc. of the Linear Accelerator Conference (LINAC 2006). Knoxville, USA, Aug., 2006. P. 256–258.
5. **Гавриш Ю. Н., Вахрушин И. Ю., Павленко А. В. и др.** Досмотровый радиометрический комплекс для контроля крупногабаритных автотранспортных средств и грузов // Вопросы атомной науки и техники. 2010. № 2. С. 3–8.
6. **Lecoq P., Gektin A., Korzhik M.** Inorganic Scintillators for Detector Systems: Physical Principles and Crystal Engineering (Particle Acceleration and Detection). Springer International Publishing, Switzerland, 2017. P. 289–311.
7. **Sumner R.** The L3 BGO electromagnetic calorimeter // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1988. **A265**, Iss. 1–2. P. 252–257. DOI: 10.1016/0168-9002(88)91078-9.
8. **Scholze F., Henneken H., Kuschnerus P. et al.** Determination of the electron–hole pair creation energy for semiconductors from the spectral responsivity of photodiodes // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2000. **A439**, Iss. 2–3. P. 208–215. DOI: 10.1016/S0168-9002(99)00937-7.
9. **Brun R., Bruyant F., Maire M. et al.** GEANT3 Reference Manual // CERN Program Library Long Writup W5013, DD/EE/84-1. 1987.
10. **Cherry S. R., Shao Y., Tornai M. P. et al.** Collection of scintillation light from small BGO crystals // IEEE Trans. Nuclear Sci. 1995. **42**, Iss. 4. P. 1058–1063. DOI: 10.1109/23.467749.
11. **Hoffman E. J., Tornai M. P., Levin C. S. et al.** A dual detector beta-ray imaging probe with gamma-ray background suppression for use in intra-operative detection of radiolabeled tumors // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1998. **A409**. P. 511–516. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)01305-3.
12. **Kuraray Co., LTD.** Methacrylic Resin Division, Scintillation Materials. URL: <http://www.kuraray.co.jp/en/> (дата обращения: 25.01.2021).
13. **Augusto Alves Jr. A., Andrade Filho L. M., Barbosa A. F. et al.** The LHCb Detector at the LHC // Journ. Instrumentation. 2008. **3**. S08005. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08005/meta> (дата обращения: 25.01.2021).
14. **Korbel V.** A hadronic tile calorimeter for the TESLA detector // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 2004. **A518**. P. 49–53. DOI: 10.1016/j.nima.2003.10.021.
15. **Bolen B., Booke M., Cremaldi L. et al.** Study of the performance of scintillating tiles with WLS fiber readout // Proc. of the IEEE Nuclear Science Symposium (NSS 1994). Norfolk, USA, 1994. Vol. 2. P. 543–547. DOI: 10.1109/NSSMIC.1994.474545.
16. **Saint-gobain crystals.** URL: <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/efficiency-calculations.pdf> (дата обращения: 25.01.2021).
17. **NIST.** URL: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database/> (дата обращения: 25.01.2021).
18. **Sony ICX084AL.** URL: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/727373/Sony/ICX084AL/1> (дата обращения: 25.01.2021).

19. **Maidment A., Yaffe M.** Analysis of signal propagation in optically coupled detectors for digital mammography: II Lens and fibre optics // *Phys. Med. Biol.* 1996. **41**, N 3. P. 475–493. DOI: 10.1088/0031-9155/41/3/010.
20. **Tornai M. P., Levin C., Macdonald L., Hoffman E. J.** Investigation of crystal geometries for fiber coupled gamma imaging intra-operative probes // *IEEE Trans. Nuclear Sci.* 1997. **44**, N 3. P. 1254–1261. DOI: 10.1109/23.596997.
21. **Харжеев Ю. Н.** Сцинтилляционные счётчики в современных экспериментах по физике высоких энергий // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2015. **46**, вып. 4. С. 1254.
22. **Hamamatsu Photonics.** K.K. and its affiliates. URL: <https://www.hamamatsu.com> (дата обращения: 25.01.2021).
23. **CAEN.** S.p.A. Tools for Discovery. 2021. URL: <https://www.caen.it> (дата обращения: 25.01.2021).
24. **Мачихильян И.** Реконструкция и начальная калибровка отклика кремниевых фотоумножителей в эксперименте DANSS // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2018. **49**, вып. 1. С. 118–123.
25. **Bukin D. A., Druzhinin V. P., Golubev V. B., Srednyakov S. I.** Scintillation counter with WLS fiber readout // *Nucl. Instr. Meth.* 1997. **A384**, Iss. 2–3. P. 360–363. DOI: 10.1016/S0168-9002(96)00758-9.

Поступила в редакцию 25.01.2021

После доработки 16.02.2021

Принята к публикации 01.03.2021
