

УДК 622.243.23

Голодных Евгений Вадимович, аспирант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: evgen_ferrum@mail.ru
Область научных интересов: системы ориентации скважинных геофизических приборов и комплексов.

ОБЗОР ДЕТЕКТОРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ СТВОЛА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

Е.В. Голодных

Томский политехнический университет

E-mail: evgen_ferrum@mail.ru

Представлен обзор детекторов гамма-излучения и принципы их работы. Приведены основные характеристики счетчиков гамма-излучения. Отмечены основные достоинства и недостатки данных устройств. Выбран детектор для регистрации гамма-излучения в процессе горизонтального бурения нефтяных и газовых скважин.

Ключевые слова:

Гамма-квант, счетчик, детектор, сцинтиллятор, электрон.

Получение достоверной и оперативной информации о значениях естественного гамма-излучения в процессе горизонтального бурения нефтяных и газовых скважин является одной из важнейших задач. Данную задачу решают с помощью устройства, встраиваемого в компоновку буровой колонны и обеспечивающего контроль пространственной ориентации бурового инструмента относительно перекрывающих толщ в процессе горизонтального бурения по продуктивному пласту, получившего название «Устройство для контроля положения ствола горизонтальной скважины». Одной из важнейших составляющих данного устройства является детектор гамма-излучения, от выбора которого зависит точность и время проводки горизонтальных скважин по продуктивному пласту.

Детекторы гамма-излучения измеряют радиоактивное излучение естественного происхождения. Такое естественное гамма-излучение испускается радиоактивными элементами, содержащимися в осадочных породах, калием (К), торием (ТН) и ураном (U). Калий и торий тесно связаны с присутствием глинистых минералов в сланцах (иллит, каолинит и монтмориллонит), в то время как уран может быть обнаружен в песках, сланцах и в определенных углеводородных породах. Наибольшее влияние на значение естественного гамма-излучения оказывает калий, так как его содержание в горных породах составляет 1...3 %. Содержания тория в горных породах составляет $1...12 \cdot 10^{-4} \%$, а урана $0,1...4 \cdot 10^{-4} \%$ [1]. Радиоактивное излучение калия является ярко выраженным, с единственным значением энергии в 1,46 МэВ. Торий и уран испускают радиоактивное излучение в определенном диапазоне энергий, но с определенной пиковой частотой. Эти пики характеризуются тем, что они особенно четко отслеживаются на энергетических уровнях в 2,62 МэВ для тория и в 1,7 МэВ для урана (рис. 1) [2].

При горизонтальном бурении нефтяных и газовых скважин буровая компоновка – 1, в состав которой входит устройство для контроля положения ствола горизонтальной скважины – 2, движется по продуктивному пласту-коллектору – 3 (рис. 2). В процессе бурения происходит измерение естественного гамма-излучения детектором – 4, пласт-коллектор – 3 (песчаник) отличается существенно меньшими значениями естественного гамма-излучения, в отличие от перекрывающих пород – 5 (глина). Среднее значение естественной радиоактивности для песчаника 10...15 Бк/кг, для глины (абсорбирует радиоактивные элементы) 50...80 Бк/кг (единицы активности радионуклида представляют собой число распадов в единицу времени; 1 Бк = 1 распад в секунду) [3]. Увеличение значений гамма-излучения по направлению бурения свидетельствует о том, что буровая компоновка приближается к границе пласта-коллектора.

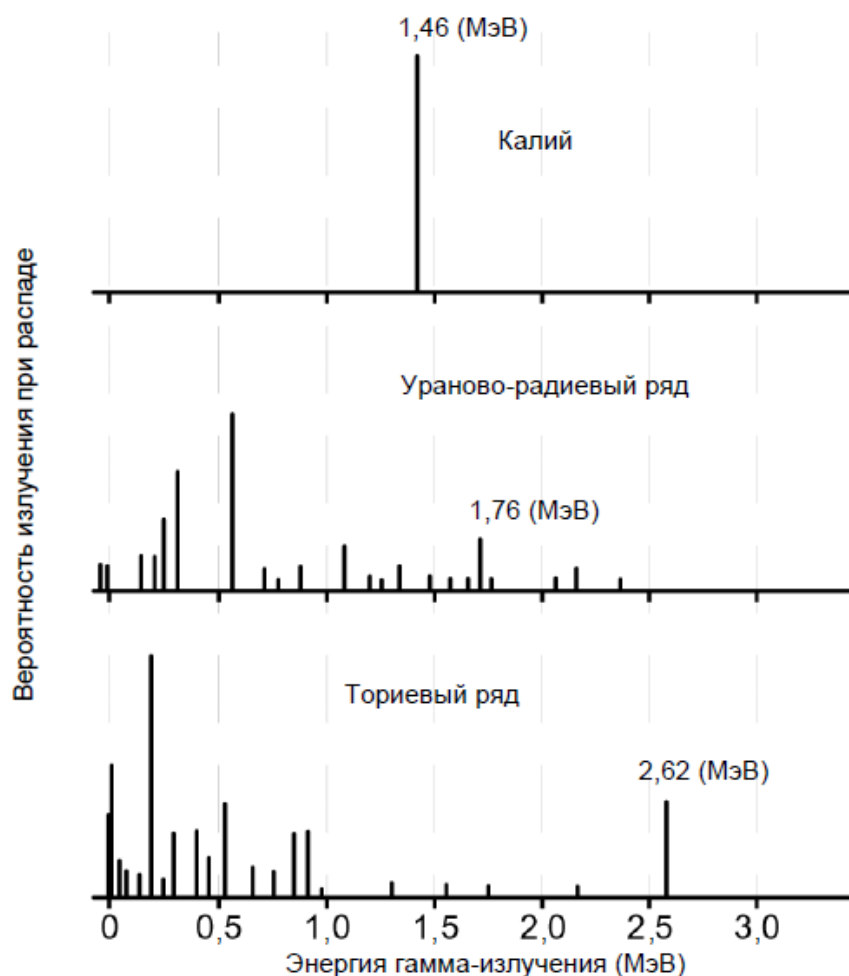


Рис. 1. Спектр гамма-излучения

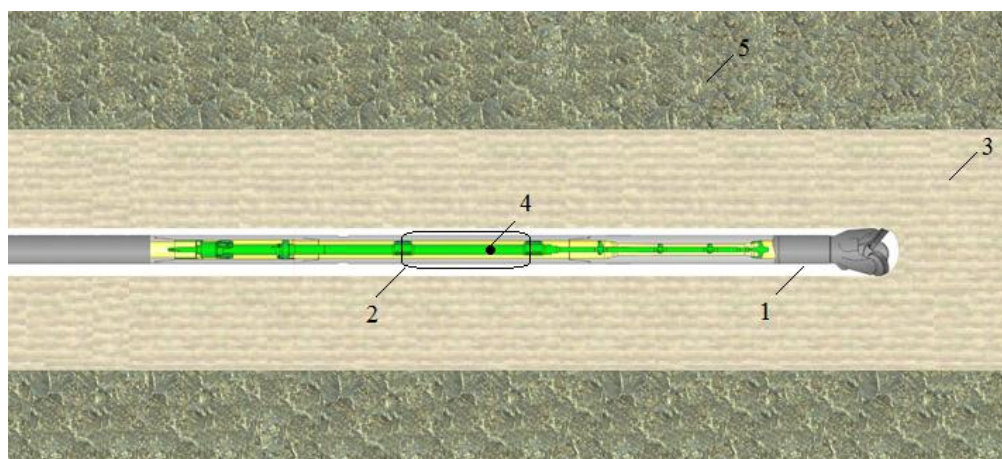


Рис. 2. Схема горизонтального бурения

Детектирование излучений – это восстановление характеристик излучения по сигналам, измеренным на выходах детекторов. Для этого необходимо знать, прежде всего, общие характеристики детекторов излучения.

Наиболее простой тип детектора – счетчик частиц. Счетчиком может быть любой детектор, регистрирующий отдельные частицы независимо от природы сигнала. Важно отметить, что счетчик позволяет определить момент прохождения частицы через его объем. Форма им-

пульса на выходе счетчика характеризует в основном процессы, происходящие в нем. Эти процессы в истинных счетчиках, таких как счетчик Гейгера–Мюллера, практически не зависят от природы частицы. Однако форма импульса может сильно зависеть от места прохождения частицы через детектор.

Сигнал на выходе детектора пропорционален поглощенной в его объеме энергии. Любой пропорциональный детектор может работать как счетчик частиц.

При измерениях гамма-квантов наибольшее распространение получили приборы с полупроводниковыми, сцинтилляционными и газоразрядными детекторами, которые обладают высокой чувствительностью и позволяют вести счет отдельных частиц и фотонов, а также измерять их энергию. Реже для измерения гамма-квантов используют приборы с ионизационными камерами, имеющими меньшую чувствительность.

Одна из основных характеристик счетчика – эффективность регистрации частиц. Она определяется как отношение

$$\eta_p = \frac{N_p}{N},$$

где N_p – число зарегистрированных частиц (квантов); N – число частиц (квантов), попавших за это же время в рабочий объем детектора [4].

Эффективность регистрации зависит от многих факторов. Она отличается не только для различных счетчиков, но для одного и того же счетчика, поскольку зависит от вида излучения и его энергии.

Рассмотрим различные первичные датчики регистрации гамма-излучения, их достоинства и недостатки.

Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный метод основан на регистрации коротких вспышек света – сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах при прохождении через них заряженных частиц. Сцинтилляции отличаются от других видов свечения тем, что они обусловлены электронными переходами внутри центра свечения (ЦС), которым может быть атом, молекула, ион или более сложное образование. Сцинтилляции имеют конечную длительность свечения, определяемую в основном временем пребывания ЦС в возбужденном состоянии. От индуцированного излучения лазера сцинтилляции отличаются тем, что являются спонтанным и некогерентным излучением. Сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора и прибора, преобразующего световые вспышки в электрический сигнал (например, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)) [4].

Упрощенно схема такого преобразования выглядит следующим образом.

Быстрая заряженная частица, попадая в сцинтиллятор, теряет энергию E_{π} . Некоторая доля этой энергии преобразуется в световую E_{ϕ} . Конверсионная эффективность

$$\frac{E_{\phi}}{E_{\pi}} = \eta_k$$

в зависимости от типа сцинтиллятора изменяется от 0,01 до 0,3 [4]. Зная η_k и E_{π} , можно определить число фотонов N_{ϕ} , испускаемых за время t , которое также зависит от типа сцинтиллятора и составляет $10^{-5} \dots 10^{-9}$ с;

$$N_{\phi} = \frac{E_{\pi} \eta_k}{h\nu},$$

где ν – скорость (энергия) кванта; h – амплитуда импульса [4]. Фотоны, число которых зависит от коэффициента светособирания ($\eta_c = 0,3 \dots 0,8$), попадают на катод ФЭУ. В результате фотоэффекта с поверхности катода в объем ФЭУ выходят фотоэлектроны. Число фотоэлектронов N_s зависит от величины g , определяемой квантовой эффективностью катода и вероятностью выхода фотоэлектрона в объем ФЭУ, и составляет обычно 0,1...0,15. Фотоэлектроны собираются на первом диноде в количестве

$$N_{\text{эд}} = N_{\phi} \cdot \eta_c \cdot \eta_s \cdot g$$

(если учитывать коэффициент собирания электронов $\eta_e \approx 0,7$) [4]. Затем в результате вторичной эмиссии число их увеличивается. После прохождения всех динодов коэффициент усиления достигает $M = 10^4 \dots 10^8$ [4].

Такой режим работы, когда каждый импульс на выходе ФЭУ порождается одним фотоэлектроном, называется одноэлектронным. Число одноэлектронных импульсов пропорционально энергии частицы, поглощенной в сцинтилляторе (E_n). Одноэлектронный режим целесообразно использовать, если число фотонов в сцинтилляции мало ($< 10^4$). Чаще всего сцинтилляционный детектор работает в импульсном (интегральном) режиме. В этом случае средний интервал времени между одноэлектронными импульсами (если число фотонов в сцинтилляции порядка $10^4 \dots 10^5$, то этот интервал $\sim 10^{-14}$ с) меньше их длительности и как следствие происходит наложение импульсов во времени. Таким образом, форма суммарного импульса тока ФЭУ соответствует изменению интенсивности свечения сцинтиллятора во времени [4].

При регистрации гамма-излучения первой стадией является процесс генерации первичных электронов в результате фото- и комптон-взаимодействий и образования электрон-позитронной пары. Дальнейшее преобразование происходит так же, как описано выше.

Сцинтилляторы делят на два основных класса: неорганические (галогениды щелочных металлов) и органические (органические сцинтилляторы, сцинтиллирующие растворы). Кроме того, все сцинтилляторы делят на спектрометрические (с высокой разрешающей способностью) и счетные (с более низкой разрешающей способностью).

Достоинства сцинтилляционных детекторов:

- высокая эффективность регистрации, особенно гамма-квантов больших энергий, в десятки раз превышающая эффективность газоразрядных счетчиков;
- высокая разрешающая способность, достигающая 10^{-9} с⁻¹;
- возможность измерения энергии частиц;
- возможность создания счетчиков различной геометрической формы и объема;
- устойчивость к высоким температурам, давлениям и вибрациям.

Недостатки сцинтилляционных детекторов:

- гигроскопичность, требующая герметизации детектора.

Характеристики сцинтилляционных детекторов

1. Конверсионная эффективность – отношение энергии, излучаемой сцинтиллятором в виде вспышки света, к поглощенной энергии частицы или кванта. Конверсионная эффективность используемых сцинтилляционных детекторов находится в пределах от долей процента до 28 % [5].

2. Техническая конверсионная эффективность (технический световой выход) – отношение световой энергии, используемой фотоэлектронным умножителем, к энергии регистрируемого излучения, теряемой в сцинтилляторе (определяется в процентах от светового выхода антрацена или йодистого натрия, активированного таллием). Технический световой выход зависит не только от конверсионной эффективности сцинтиллятора, но также от прозрачности сцинтиллятора к собственному излучению и оптических свойств контейнера, в котором находится сцинтиллятор. Для сравнения одинаковых по типу и размерам сцинтилляторов используется понятие относительной эффективности, которая показывает, во сколько раз амплитуда импульсов сцинтилляционного счетчика с одним сцинтиллятором больше амплитуды импульсов того же счетчика с другим сцинтиллятором при регистрации одного и того же излучения [6].

3. Свечение сцинтиллятора (спектр свечения) – распределение световой энергии сцинтилляций по длине волн. В таблицах и справочниках часто указывается длина волны в ангстремах, на которую приходится максимальное значение этого распределения.

4. Спектр поглощения собственного излучения – диапазон длин волн, в котором наблюдается максимальное поглощение собственного излучения в сцинтилляторе.

5. Время высвечивания – время, в течение которого интенсивность сцинтилляции уменьшается в «e» раз от максимальной (e – основание натуральных логарифмов).

Необходимой составляющей сцинтилляционного детектора является ФЭУ, который преобразует световую энергию сцинтилляций в электрические сигналы.

Неорганические сцинтилляторы

Из неорганических сцинтилляторов (табл. 1) наибольшее практическое применение получили активированные монокристаллы щелочногалогеновых металлов (ЩГК), а также кристаллы сернистого цинка и фтористого кальция. Неактивированные ЩГК являются хорошими сцинтилляторами с большим световыходом и малым временем высвечивания при температуре порядка $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Все рассмотренные кристаллы имеют кубическую кристаллическую решетку, кроме ZnS(Ag), имеющего гексагональную решетку [7].

NaI(Tl) – монокристаллы йодистого натрия, активированного таллием, прозрачны, бесцветны, иногда с желтизной, показатель преломления 1,85. Кристаллы гигроскопичны, поэтому их упаковывают в герметичные контейнеры с прозрачным окном. Кристаллы приклеивают полированной поверхностью к стеклу силиконовым клеем. Остальные поверхности матированы. Между матированными поверхностями и корпусом контейнера размещен отражатель света – уплотненный слой оксида магния толщиной до 2,5 мм. Монокристаллы выпускаются в виде стержней диаметрами 10...200 мм и высотой 1...200 мм. При длительном пребывании на свету кристаллы желтеют [4].

CsI(Tl) – монокристаллы йодистого цезия, активированного таллием, выпускаются в виде стержней и пластин диаметрами 10...110 мм и высотой 0,1...100 мм. Тонкие кристаллы применяют при регистрации альфа- и бета-излучений, толстые – при регистрации гамма-квантов (радиационная длина 1,86 см). Кристаллы пластичны, негигроскопичны, поэтому их можно использовать и без контейнера; коэффициент преломления 1,79, спектр излучения белый, постоянная времени высвечивания $(0,5...1)\times 10^{-6}$ с, технический световой выход в процентах светового выхода NaI(Tl) составляет $\approx 75\%$ [4].

KI(Tl) – монокристаллы йодистого калия, активированного таллием, применяются при регистрации гамма- и рентгеновских лучей. Прозрачные, бесцветные кристаллы негигроскопичны и менее хрупки, чем кристаллы йодистого натрия; коэффициент преломления 1,68, технический световой выход в процентах светового выхода NaI(Tl) составляет $\approx 45...50\%$ [4].

Кристаллы CaF₂(Eu) представляют большой интерес для регистрации гамма-квантов на фоне нейтронов. Это связано с тем, что сечения радиационного захвата нейтронов ядрами Ca и F малы по сравнению с сечениями взаимодействия гамма-квантов. Ядра отдачи, получающиеся при упругом рассеянии нейтронов на ядрах Ca и F, имеют сравнительно малую энергию и большую удельную ионизацию.

Кристаллы BaF₂ и Bi₄Ge₃O₁₂ негигроскопичны и могут выращиваться до размеров порядка десятков сантиметров. Показатели преломления 1,56 и 2,15 соответственно. Эти кристаллы используются для регистрации гамма-квантов. Радиационная длина X₀ равна 2,1 и 1,12 см соответственно [4].

Таблица 1. Свойства неорганических кристаллов [6]

| Кристалл | Плотность, кг/м ³ ·10 ³ | l, нм | t, нс | η_k , отн. ед. | η_k , % | m_a/m_e | n |
|---|---|-------|-------|------------------------|--------------|-----------|------|
| NaI(Tl) | 3,67 | 410 | 250 | 1 | 15,8 | 0,5 | 1,85 |
| CsI(Tl) | 4,51 | 560 | 700 | 0,3 | 6 | 0,5 | 1,79 |
| KI(Tl) | 3,13 | 410 | 1000 | 0,2 | 10 | 0,6 | 1,68 |
| CaF ₂ (Eu) | 3,18 | 250 | 0,2 | 0,15 | – | 1 | 1,71 |
| BaF ₂ | 4,9 | 225 | 0,6 | 0,19 | – | 1 | 1,56 |
| Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ | – | 480 | 350 | 0,14 | – | 1 | 2,15 |

m_a/m_e – отношение световыходов при облучении α -частицами и электронами одинаковой энергии (около 5 МэВ); n – показатель преломления.

Органические сцинтилляторы

Этот класс сцинтилляторов подразделяется на органические монокристаллы и прозрачные растворы. Органические сцинтилляторы имеют следующие особенности:

- малое время высвечивания ($10^{-8} \dots 10^{-9}$ с), приближающееся ко времени жизни отдельной молекулы в возбужденном состоянии [5];
- световыход органических сцинтилляторов для электронов значительно выше, чем для тяжелых частиц, например для альфа-частиц (в 10 раз) [5];
- импульс высвечивания содержит быструю и медленную компоненты, среднее время высвечивания которых может различаться в 100 раз. Соотношение между интенсивностями быстрой и медленной компонент зависит от плотности ионизации, позволяет выделять импульсы, созданные электронами, на фоне импульсов от тяжелых заряженных частиц [5].

Органическими монокристаллами (табл. 2) в основном являются ароматические углеводороды (антрацен, стильбен, толан, нафталин, терфенил и т. д.). Световыход и соотношения между интенсивностями быстрой и медленной компонент зависят от ориентации трека тяжелой заряженной частицы относительно осей кристаллической решетки [6].

Антрацен – двоякопреломляющий бесцветный кристалл с фиолетовой опалесценцией, в проходящем свете соломенно-желтый, имеет наибольшую среди органических сцинтилляторов конверсионную эффективность ($\approx 4\%$), с понижением температуры до -70°C конверсионная эффективность достигает 6% . Гигроскопичен. Радиационная длина $1,52$ см. Кристалл очень непрочен и при резких изменениях температуры растрескивается. Используется обычно для регистрации бета-излучения [6].

Стильбен – прозрачный бесцветный кристалл с голубой опалесценцией, крайне хрупок, не допускает резких колебаний температур. Конверсионная эффективность стильбена меньше, чем у антрацена, и составляет около 2% , но он химически устойчив и может применяться без контейнера. Значительно меньше время высвечивания быстрой компоненты. Применяется для регистрации нейтронного и гамма-излучения (радиационная длина $1,62$ см) [6].

Толан – прозрачный бесцветный кристалл с голубой опалесценцией, световой выход равен половине светового выхода антрацена. Время высвечивания $\approx 10^{-8}$ с. Применяется для регистрации гамма-излучения [6].

Нафталин. Кристаллы летучи, поэтому применяются только в контейнерах. Используется при регистрации гамма-квантов (радиационная длина $1,58$ см). Для повышения световыхода в монокристалл вводятся различные активаторы. Например, сцинтилляционная эффективность нафталина, активированного этиленом (применяется для регистрации альфа-частиц), составляет $120 \dots 130\%$ по сравнению со стильбеном [6].

Таблица 2. Свойства некоторых органических сцинтилляторов [6]

| Сцинтилляторы | Плотность, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^3$ | Положение максимума в спектре люминесценции, нм | η_k , отн. ед. | t, нс | m_a/m_e |
|---|---------------------------------------|---|---------------------|-------|-----------|
| Антрацен ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$) | 1,25 | 445 | 1 | 30 | 0,1 |
| Стильбен ($\text{C}_{14}\text{H}_{12}$) | 1,16 | 410 | 0,4–9,7 | 6,2 | 0,1 |
| Нафталин (C_{10}H_8) | 1,15 | 345 | 0,2 | 70 | 0,1 |

Ионизационные детекторы

Ионизационный метод детектирования ядерных излучений основан на измерении тока (напряжения), возникающего в результате движения под действием электрического поля свободных зарядов, образованных излучением. Благодаря простоте и точности преобразования ионизации в электрический сигнал такие приборы широко используются как в научных исследованиях, так и в промышленности для дозиметрии, радиометрии и спектрометрии всех видов заряженных частиц, фотонного излучения и нейтронов.

Существует большое число различных детекторов, рабочим веществом которых является газ или полупроводник. Детекторы различаются и по принципу действия, и по области применения.

Группа ионизационных детекторов включает в себя:

- а) газонаполненные детекторы – ионизационные камеры, пропорциональные счетчики, счетчики Гейгера–Мюллера, пропорциональные камеры, искровые счетчики, многоэлектродные искровые камеры, дрейфовые счетчики, дрейфовые камеры;
- б) жидкостные ионизационные детекторы;
- в) твердотельные детекторы – кристаллические счетчики, однородные полупроводниковые детекторы, детекторы с р-п-переходом, р-і-п-детекторы.

Для регистрации гамма-квантов используют газонаполненные детекторы с толстыми стенками. Это могут быть как ионизационные камеры, так и газоразрядные счетчики, а также полупроводниковые детекторы с большой толщиной обедненной зоны.

Газонаполненные ионизационные детекторы

Газонаполненные ионизационные детекторы представляют собой конденсаторы, в которых пространство между электродами заполнено газом. Основное отличие газовых ионизационных детекторов заключается в методах усиления ионизационного эффекта.

Ионизационные камеры

Ионизационные камеры (ИК) – ионизационные детекторы без газового усиления. В этом случае измеряется эффект от первичной ионизации, вызванной проходящей частицей. ИК имеют самую различную конфигурацию (плоские, цилиндрические, сферические) и объем (от долей 1 см³ при измерении тепловыделения в экранах реакторов до десятков и сотен литров при исследовании распределения рассеянного излучения в воздухе).

Для ИК с плоскопараллельными электродами сигнал на выходе детектора имеет быструю составляющую, обусловленную током электронов, и медленную, обусловленную дрейфом в противоположном направлении положительных ионов [4].

Счетчик Гейгера–Мюллера

Ионизационные детекторы, работающие в режиме самостоятельного газового разряда, называют счетчиками Гейгера–Мюллера. В таких детекторах электронная лавина в результате фотонной ионизации вызывает развитие разряда вдоль анодной нити (самогасящиеся счетчики) или по всему объему в результате эмиссии электронов с катода (несамогасящиеся счетчики).

В нессамогасящихся счетчиках применяется радиотехнический способ прерывания газового разряда. Для этого в цепь счетчика вводится высокоомное сопротивление $R \sim 10^8 \dots 10^9$ Ом, которое увеличивает время (t) восстановления потенциала $U_{сч}$ на электродах детектора, понизившегося в результате протекания тока I при возникновении самостоятельного газового разряда, до значения:

$$\frac{U_{ист}}{U_{ст}} = U_{ист} - IR \quad [8]$$
$$t = CR$$

(t – время разряда паразитной емкости счетчика через сопротивление R). Длительность газового разряда в счетчике $\approx 10^{-6}$ с. После гашения газового разряда положительные ионы дрейфуют к катоду и нейтрализуются на нем, и за время $t \approx 10^{-2}$ с напряжение на счетчике восстанавливается. Счетчик с таким «мертвым временем» способен регистрировать примерно 100 частиц/с. Конструктивно счетчики могут быть цилиндрической и коробчатой формы. В последних внутри металлического корпуса, являющегося общим катодом, натягиваются тонкие нити-аноды. Электроны и ионы, появившиеся после прохождения в счетчике заряженной частицы, движутся в направлении соответствующих электродов. Электроны достигают нити за время $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с, образуя по пути новые электроны, ионы и возбужденные молекулы газа. Эти молекулы испускают коротковолновое излучение, которое, в свою очередь, выбивает фотоэлектроны из катода и молекул газа. Таким образом, за очень малое время разряд охватывает весь счетчик [8].

За время прохождения нескольких электронно-фотонных лавин рожденные положительные ионы практически остаются на месте, так как их подвижность намного меньше под-

вижности электронов. А поскольку вторичная ионизация происходит вблизи нити, то вокруг нити образуется чехол положительных зарядов, который снижает напряженность поля вблизи нити и, тем самым практически прекращает образование новых электронно-фотонных лавин. На этом электронные процессы в счетчике не заканчиваются, так как положительные ионы, подходя к катоду, вырывают с его поверхности электроны, которые под действием электрического поля устремляются к нити. Дальнейшее зависит от того, восстановится или нет потенциал нити до прежнего значения к моменту подхода к ней этих электронов.

Достоинства счетчика Гейгера–Мюллера:

- амплитуда сигнала достигает нескольких вольт и легко регистрируется;
- устойчивость к высоким температурам

Недостатки счетчика Гейгера-Мюллера:

- плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в объеме детектора, мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы;
- энергия, необходимая для рождения пары электрон–ион в газе велика (30...40 эВ), что увеличивает относительные флуктуации числа зарядов и ухудшает энергетическое разрешение;
- регистрирует факт прохождения частицы через счётчик, но не позволяет измерить энергию частицы.

Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы (ППД), являющиеся в некотором смысле аналогами ионизационных камер, обладают перед ними рядом существенных преимуществ: 1) высокое энергетическое разрешение; 2) на два–три порядка больше масса вещества, заключенная в чувствительном объеме, что особенно существенно при регистрации фотонов и заряженных частиц высокой энергии; 3) лучшие временные характеристики сигнала (крутой передний фронт, обеспечивающий временное разрешение порядка нескольких наносекунд) [4].

Чувствительный объем ППД может достигать сотен кубических сантиметров, что обеспечивает высокую эффективность регистрации гамма-излучения. В то же время ППД можно изготовить с очень малым промежутком между электродами, а один или оба электрода сделать очень тонкими. Основными материалами для изготовления детекторов являются германий и кремний.

Так же, как и в ионизационной камере, в чувствительном объеме ППД при прохождении ионизирующего излучения образуются носители заряда, которые под действием внешнего электрического поля собираются на электродах. Возникающие при этом импульсы тока или напряжения с амплитудой используются для регистрации ионизирующих частиц, однако средняя энергия (ω), затрачиваемая на образование одной пары электрон–дырка, примерно в 10 раз меньше, чем в газе, и составляет в кремнии $\omega = 3,6$ эВ и в германии $\omega = 2,9$ эВ. В отличие от ионизационной камеры, где захват электронов приводит к образованию подвижного иона, здесь возможен захват носителей заряда в объеме детектора на неподвижные центры, что приводит к новым по сравнению с газовыми детекторами явлениям. Кроме того, в полупроводниковом детекторе заряды могут выходить из электродов и входить в них. Поэтому большое значение имеют контактные явления [4].

Поскольку в твердом теле наименее связанные электроны не удерживаются около определенных атомов, можно создать результирующий направленный поток электронов в веществе. Существуют два класса ППД: однородные и неоднородные.

Однородный детектор представляет собой кристалл с одинаковым по всему объему типом проводимости (электронной или дырочной).

В неоднородном детекторе имеются области с различным типом проводимости – электронным (n) и дырочным (p). На границе этих областей возникает потенциальный барьер, препятствующий свободному прохождению носителей заряда через полупроводник. Неоднородные детекторы различаются по структуре (n-p, p-i-n); по способу изготовления (поверхностно-барьерные, диффузионные, детекторы с ионным легированием, диффузионно-дрейфовые, сплавные); по принципу работы (детекторы без усиления, с пропорциональным усилением, с лавинным усилением) [7].

Радиационные повреждения полупроводниковых детекторов

При облучении детекторов ионизирующим излучением кроме полезного эффекта (создание электронно-дырочных пар) проявляется много побочных эффектов, вызванных взаимодействием излучения с атомами полупроводника. Эти эффекты в подавляющем большинстве случаев ухудшают свойства детектора, а большие дозы излучения делают его непригодным к дальнейшей эксплуатации. Облучение в больших дозах портит все детекторы, не только полупроводниковые. Заметные изменения свойств в ППД наступают при меньших интегральных дозах, которые сравнимы с числом частиц, проходящих через детектор за время эксперимента [9].

В результате облучения изменяется сопротивление материала, что, в свою очередь, вызывает искажения электрических полей, увеличиваются токи утечки и вероятности захвата в ловушки и рекомбинации. Нарушения в общем случае создаются неравномерно по чувствительному объему, поэтому ухудшается разрешение и появляются дополнительные пики в амплитудном распределении импульсов, что является одним из признаков существенных повреждений. Кроме того, растет время сбора заряда.

Взаимодействие гамма-излучения с атомами решетки полупроводника приводит к появлению быстрых электронов, которые и обуславливают появление дефектов решетки. Сечения образования дефектов гамма-квантами малы по сравнению с сечениями образования дефектов тяжелыми частицами и нейтронами. Так, сечение образования смещений в кремнии гамма-квантом с энергией 3 МэВ $\approx 10 \dots 24 \text{ см}^2$, а это означает, что вероятность создать один дефект в слое кремния толщиной 0,1 см для такого гамма-кванта примерно равна [2].

Достоинства полупроводниковых детекторов:

- высокая разрешающая способность, достигающая 10^{-10} с^{-1} ;
- небольшое значение энергии, необходимой на образование электронно-дырочной пары (примерно в 10 раз меньше, чем на образование ион-электронной пары в газе), означает, что при прочих равных условиях амплитуда сигнала от полупроводникового счетчика в 10 раз больше амплитуды сигнала от ионизационной камеры;
- энергетическое разрешение германиевых детекторов при регистрации гамма-квантов достигает 0,1 %, что в десятки раз выше, чем у сцинтилляционных детекторов.

Недостатки полупроводниковых детекторов:

- малая эффективность при регистрации гамма-квантов больших энергий;
- ухудшение разрешающей способности при нагрузках $>10^4$ частиц в сек;
- малый ток, создаваемый в них ионизирующей частицей, настолько мал, что для его измерения необходимы электронные усилители с большими коэффициентами усиления;
- конечное время жизни полупроводникового детектора при высоких дозах облучения из-за накопления радиационных дефектов.

Заключение

Одним из важнейших критериев при выборе детектора гамма-излучения является разрешающая способность детектора. Также в процессе горизонтального бурения нефтяных и газовых скважин на устройство для контроля положения ствола горизонтальной скважины, в состав которого входит и сам детектор гамма-излучения, оказывает влияние несколько разрушающих факторов: высокая температура, высокое давление, сильнейшие вибрации. Существенным критерием в выборе детектора является экономический аспект и возможность создания детектора цилиндрической формы малого диаметра.

На основе перечисленных критериев приведено сравнение наиболее перспективных детекторов гамма-излучения (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение детекторов гамма-излучения

| Детектор | Сцинтиллятор | Счетчик Гейгера–Мюллера | Полупроводниковый детектор |
|--------------------------------------|--------------|-------------------------|----------------------------|
| Высокая разрешающая способность | ✓ | – | ✓ |
| Термоустойчивость | ✓ | ✓ | – |
| Виброустойчивость | ✓ | – | – |
| Устойчивость к высокому давлению | ✓ | – | – |
| Цилиндрическая форма малого диаметра | ✓ | – | ✓ |
| Невысокая стоимость | ✓ | ✓ | – |

Исходя их анализа, наиболее оптимальным детектором для контроля положения ствола скважины в процессе горизонтального бурения нефтяных и газовых скважин является сцинтиллятор на основе йодистого натрия активированного таллием, основным минусом данного детектора является его гигроскопичность, однако данная проблема решается герметизацией детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Н.Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите. – М.: Медгиз, 1956. – 167 с.
2. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001...100 МэВ и элементов с 1 по 100). – М.: Атомиздат, 1973. – 256 с.
3. Wyard S.J. Radioactive-source corrections for Bremsstrahlung and scatter // *Nucleonics*. – 1955. – V. 13. – № 7. – P. 44–47.
4. Сидоренко В.В., Кузнецов Ю.А., Оводенко А.А. Детекторы ионизирующих излучений. – Л.: Судостроение, 1984. – 240 с.
5. Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 379 с.
6. Физические справочные данные // NIST Physical Reference Data. 2010. URL: <http://www.nist.gov/pml/data/index.cfm> (дата обращения: 19.10.2012).
7. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 132 с.
8. Курашов А.А. Идентификация ионизирующих излучений средних и низких энергий. – М.: Атомиздат, 1979. – 79 с.
9. Радиоактивные вещества // Новые справочники технолога. 2008. URL: <http://chemanalytica.com>. (дата обращения: 19.10.2012).

Поступила 19.02.2013 г.