

**ОПТОВОЛОКОННАЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
НА БАЗЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**© 2013 С.Г. Новиков¹, А.А. Черторийский², А.В. Беринцев¹¹ Научно-исследовательский технологический институт Ульяновского государственного университета² Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Поступила в редакцию 26.11.2013

Разработана оптоволоконная дозиметрическая система, включающая в себя сенсорный элемент на основе полимерного сцинтилляционного волокна, соединенного посредством транспортного оптического волокна с фотоприемником, сигнал которого обрабатывается с помощью микроконтроллерной системы и преобразуется в величины активности источника ионизирующего излучения (ИИИ). Оптоволоконная дозиметрическая система предназначена для измерения активности источника ионизирующего излучения на выбранном локальном участке хроматографической колонны, используемой для разделения смесей изотопов радиоактивных веществ на компоненты за счет различной скорости их перемещения через сорбент. Оптоволоконная дозиметрическая система выполняет автоматизированные измерения активности источника ионизирующего излучения с последующим хранением информации о проведенных измерениях.

Ключевые слова: дозиметрическая система, источник ионизирующего излучения, сцинтилляционное оптическое волокно.

В настоящее время все более актуальными становятся вопросы применения волоконно-оптических систем для измерения физических величин на объектах атомной энергетики. Контроль температуры, давления, активности источников ионизирующего излучения, их распределение в технологических помещениях, измерение экспозиционных доз и др. являются неотъемлемой частью систем обеспечения безопасности. Использование в качестве сенсоров оптических волокон и волоконных систем позволяет существенно упростить решение вопросов обеспечения безопасности за счет использования единой элементной базы для измерений различных физических величин, унификации систем доставки информации от сенсора к обрабатывающей системе, нечувствительности оптических волокон к внешним магнитным и электрическим полям и высокой радиационной стойкости.

Представленная в работе оптоволоконная дозиметрическая система на базе сцинтилляционного оптического волокна относится к технике регистрации электронного и бета-излучения и может быть использована при создании высокочувствительных детекторов для оптической до-

зиметрии, в частности в волоконно-оптических датчиках ионизирующих излучений, позволяющих производить долговременную дозиметрию процессов разделения изотопов на выбранных участках хроматографической колонны.

Известные на сегодня подобные волоконно-оптические радиационные датчики на основе сцинтилляционных волокон [1, 2] обычно включают в свой состав чувствительный элемент в виде одного или нескольких сцинтилляционных волокон, соединенных транспортным оптическим волокном с фотоприемным устройством. Присутствующие в сцинтилляционных волокнах легирующие примеси при взаимодействии с ионизирующим излучением испускают видимый свет, попадающий на фотоприемное устройство. В системе обработки сигнала с фотоприемного устройства проводится преобразование этого сигнала в значения, например, активности источника ионизирующего излучения. При этом сцинтилляционные волокна могут быть распределены в трехмерном пространстве и их продольные оси могут быть сориентированы в разных направлениях относительно оси падающего излучения.

Однако известные на сегодняшний день приборы не предназначены для долговременных измерений активности ИИИ в процессе разделения радиоактивных изотопов.

Таким образом, разработка волоконно-оптических устройств, позволяющих контролировать изменение во времени активности ИИИ на выбранном участке хроматографической колонны при проведении процессов разделения радиоак-

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники.

E-mail: novikovsg@ulsu.ru

Черторийский Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе.

E-mail: a-tchertor@yandex.ru

Беринцев Алексей Валентинович, инженер, аспирант Ульяновского государственного технического университета.

E-mail: berints@mail.ru

тивных изотопов, является актуальной научно-технической задачей.

Наиболее простой и эффективной для указанного применения является, на наш взгляд, конструкция оптоволоконной дозиметрической системы, показанная на рис. 1. Система состоит из располагающегося в активной зоне под воздействием ИИИ сенсорного элемента, и находящихся вне активной зоны измерительного блока и персонального компьютера, а также транспортного оптического волокна, соединяющего сенсорный элемент с измерительным блоком. Измерительный блок состоит из фотоприемника и контроллера, обеспечивающего измерение сигнала фотоприемника и передачу измерительной информации на персональный компьютер. Установленное на персональном компьютере программное обеспечение служит для отображения и обработки результатов измерений.

Основой сенсорного элемента является полимерное многомодовое сцинтилляционное волокно «Saint-Gobain Cristalls» BSF-60. Его сцинтиллирующая сердцевина диаметром 0,25 мм содержит комбинацию флуоресцентных легирующих добавок, выбранных для получения желаемого спектра свечения, и обладает заданными оптическими характеристиками и радиационной стойкостью.

Сцинтилляционная эффективность является основным свойством данных волокон. Типичное ее значение около 2,5 %, что соответствует приблизительно 8000 фотонов на МэВ энергии

минимально ионизирующей частицы. Однако волокном захватывается не более 4 % всех произведенных фотонов.

Стандартным материалом для оболочки является полиметилметакрилат $C_5H_8O_2$ (ПММА). Его плотность $1,2 \text{ г/см}^3$, а показатель преломления – 1,49. Типичная толщина оболочки около 3 % от диаметра.

Показатели преломления сердцевины и оболочки, а также площадь поперечного сечения волокна определяют эффективность захвата фотонов волокном. В круглых волокнах эффективность захвата зависит также от расстояния между осью волокна и точкой вспышки. В волокнах этого типа эффективность захвата изменяется от 3-4 % (для вспышек на оси волокна) до 7 % (для вспышек рядом с оболочкой).

В табл. 1 приведены характеристики волокна BSF-60

Во время измерения сенсорный элемент со сцинтилляционным волокном располагается в непосредственной близости от хроматографической колонны, в которой происходит выделение радиоактивных изотопов. Поток β -излучения, попадая на волокно, преобразуется в видимое оптическое излучение с длиной волны около 0,5 мкм. Часть данного излучения формирует оптический поток, распространяющийся внутри волокна в обе стороны. Мощность оптического излучения в сцинтилляционном волокне пропорциональна уровню β -излучения.

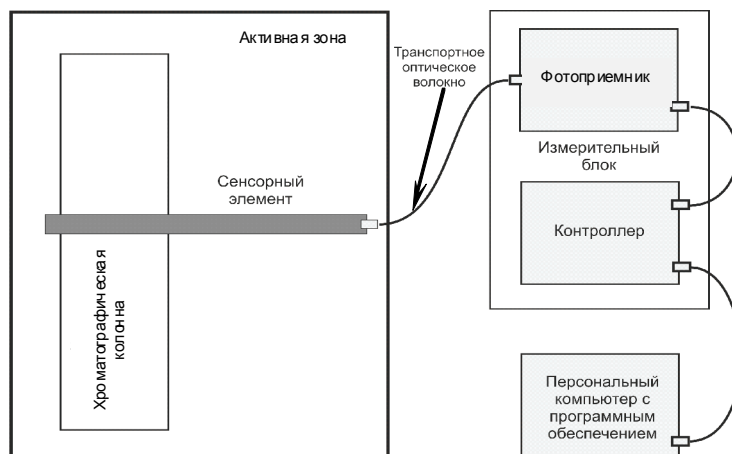


Рис.1. Структурная схема оптоволоконной дозиметрической системы

Таблица 1. Основные характеристики волокна BSF-60

Волокно	Цвет излучения	Пик излучения, нм	Время затухания, нс	Показатель поглощения, м^{-1}	Число фотонов на МэВ	Применение
BSF-60	Зеленый	530	7	<0.285	7100	С повышенной радиационной стойкостью

Для увеличения доли оптической мощности, поступающей на выходной торец сцинтилляционного волокна, на его второй торец нанесено зеркальное отражающее покрытие. Конструкция сенсорного элемента на основе сцинтилляционного волокна приведена на рис. 2.

Сцинтилляционное волокно 1 располагается витками в круглом отверстии 2 корпуса сенсорного элемента 3 и фиксируется выступами верхней и нижней крышки 4. Концы волокна через проточки, расположенные сверху и снизу корпуса сенсорного элемента, выведены во вспомогательный квадратный отсек корпуса с расположенной там оптической розеткой 5. К этой розетке подключается выходной конец волокна 6. Второй конец сцинтилляционного волокна 7 (с нанесенным зеркальным отражающим слоем 8) остается свободным. На выходе из проточек волокно может быть дополнительно зафиксировано клеем.

В верхней и нижней крышке сделаны отверстия 9, позволяющие пропустить сквозь сенсорный элемент хроматографическую колонну. Сенсор закрепляется в заданной области хроматографической колонны с помощью вспомогательных приспособлений.

Для обеспечения пространственной селекции регистрируемого β -излучения в данном варианте сенсорного элемента используется металлическая бленда. Данная бленда является частью кор-

пуса сенсорного элемента (формируется краями отверстий 9 в верхней и нижней крышках сенсорного элемента). Бленда перекрывает поток β -излучения от областей хроматографической колонны, расположенных за пределами интересующей области.

Оптическое излучение из сцинтилляционного волокна поступает в транспортное оптическое волокно. В связи с тем, что числовая апертура и диаметр сцинтилляционного волокна больше, чем данные параметры транспортного оптического волокна, при передаче оптической мощности будут наблюдаться потери. Величину потерь (в дБ) можно приблизительно оценить по формулам [3]:

$$\Delta P_{NA} = -20 \log (NA1 / NA2);$$

$$\Delta P_D = -20 \log (D1 / D2),$$

где ΔP_{NA} , ΔP_D – потери оптической мощности, вызванные несовпадением числовых апертур и диаметров сердцевин волокон, соответственно; NA1, D1 – числовая апертура и диаметр сердцевины сцинтилляционного волокна; NA2, D2 – числовая апертура и диаметр сердцевины оптического кабеля.

С учетом значений параметров D1 = 250 мкм, NA1 = 0,58, D2 = 100 мкм, NA2 = 0,28 суммарные потери при вводе излучения в оптический кабель составят около 14,3 дБ (что соответствует ослаблению мощности излучения примерно в 27 раз).

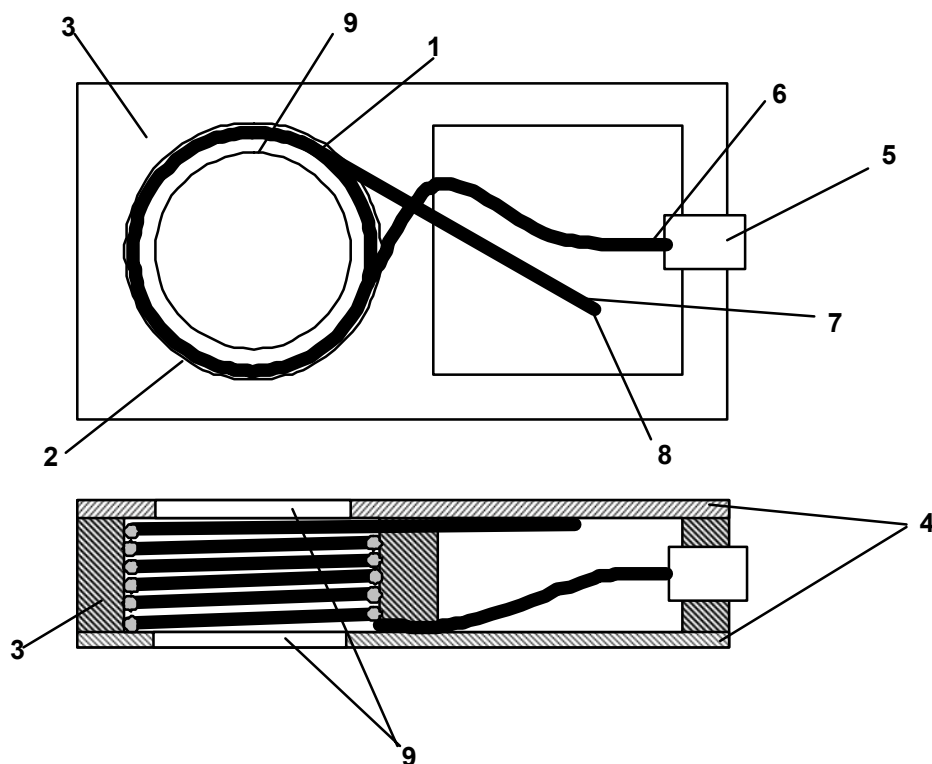


Рис. 2. Конструкция сенсорного элемента (верхняя крышка на виде сверху не показана):

1 – сцинтилляционное волокно, 2 – отверстие в корпусе, 3 – корпус, 4 – крышки, 5 – оптическая розетка, 6 – выходной конец волокна, 7 – второй конец волокна, 8 – зеркальное покрытие, 9 – отверстия в крышках

Фотоприемник измерительного блока оптоволоконной дозиметрической системы построен на основе модуля COUNT-100B-FC фирмы Laser Components, представляющий собой устройство с высокой квантовой эффективностью и широким динамическим диапазоном. Модуль обеспечивает детектирование одиночных фотонов в диапазоне длин волн 350-1000 нм. Выходной сигнал фотоприемника представляет собой электрические импульсы, количество которых в единицу времени пропорционально оптической мощности на его входе. Таким образом частота импульсов на выходе фотоприемника оказывается пропорциональна уровню β -излучения.

Измерение частоты импульсов с выхода фотоприемника осуществляет контроллер. Его функциями также являются отображение результатов измерения на индикаторе и передача данных в персональный компьютер. Контроллер реализован на базе микроконтроллера STM32F100C4T6B. Функциональная схема узла контроллера приведена на рис. 3.

Измеряемая последовательность импульсов поступает на вход делителя частоты, где делится на два и затем поступает на 32-разрядный счетчик, выход которого соединен с двумя схемами захвата. Сигналы захвата поступают с формирователя временных интервалов, на вход которого поступают импульсы с генератора опорной частоты. Формирователь временных интервалов генерирует импульсы управления схемами захвата и обеспечивает заданный период измерения. С выхода схем захвата значения кодов счетчика поступают на вычислитель, где происходит расчет значений количества импульсов в единицу времени и вычисленное значение поступает на индикатор для отображения. Также имеется воз-

можность передать полученное значение в персональный компьютер через интерфейс USB.

Источник питания формирует необходимые напряжения для питания узла от внешнего источника постоянного напряжения.

Поскольку частота тактового генератора (24 МГц) превышает максимальное значение входной последовательности ($20 \cdot 10^6$ имп / с), измерение количества входных импульсов за единицу времени выполнено прямым методом и полностью реализовано аппаратными средствами микроконтроллера. Программно осуществляется только первоначальная настройка режимов работы таймеров и их сброс по окончании счета. Каждый таймер микроконтроллера состоит из счетчика, регистров управления, нескольких регистров захвата-сравнения (CAP), регистра авто-перезагрузки (ARR) и предварительного делителя.

Подсчет входных импульсов происходит 16-разрядными таймерами TIM2 и TIM3, работающими в режиме Master и Slave, соответственно, и образующих один 32-разрядный счетчик. Этим обеспечивается необходимая разрядность счетчика, минимальное значение которой для $F_{\max} = 20 \cdot 10^6$ имп / с составляет 25 бит ($\log_2(F_{\max}) = 24,253$).

Формирование временного интервала осуществляет таймер TIM15, на вход предварительного делителя которого поступают импульсы с выхода тактового генератора частотой 24 МГц. С выхода предварительного делителя импульсы с частотой 50 кГц поступают на вход счетчика.

Временная диаграмма работы таймера показана на рис. 4.

На рис. 5 приведен алгоритм измерения частоты импульсов с выхода фотоприемника. Так,

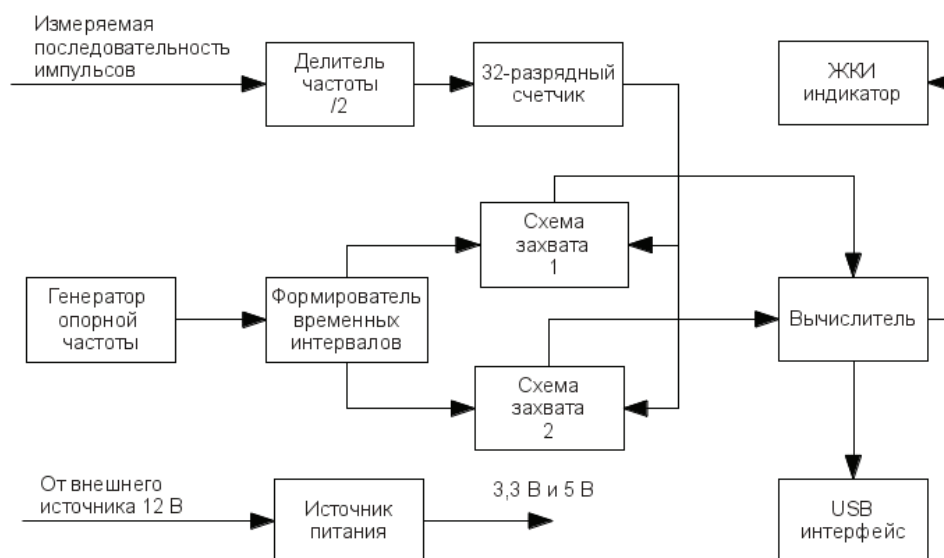


Рис. 3. Функциональная схема узла контроллера

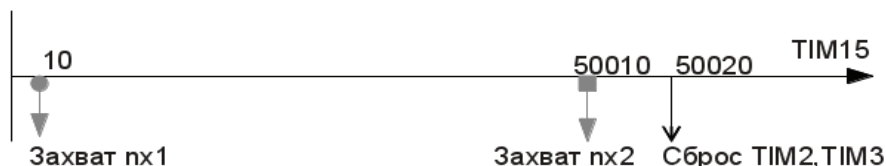


Рис. 4. Временная диаграмма работы таймера TIM15

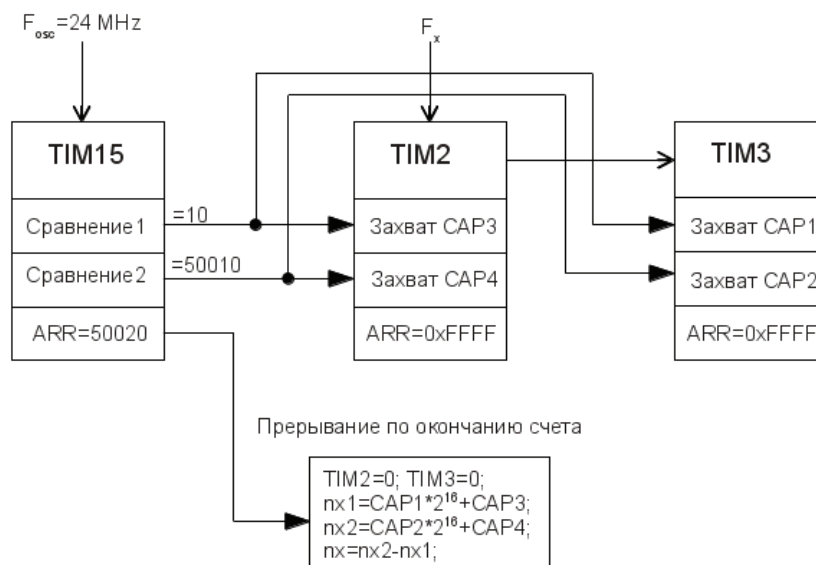


Рис. 5. Алгоритм измерения количества импульсов за единицу времени

после запуска таймера TIM15 при достижении его счетчика значения 10 происходит срабатывание первой схемы сравнения и формируется импульс захвата кода $px1$ таймеров TIM2 и TIM3, значения которых записываются в регистры захвата CAP3 и CAP1. Аналогично, при достижении TIM15 значения 50010 срабатывает вторая схема сравнения и происходит запись кода $px2$ в регистры CAP4 и CAP2. При достижении TIM15 максимального значения 50020, записанного в регистр ARR, происходит прерывание, и счет таймера начинается заново. Подпрограмма обслуживания прерывания производит сброс таймеров TIM2 и TIM3, очистку флага прерывания, и вычисляет значение количества импульсов за 1 секунду.

Данный алгоритм позволяет избавиться от ошибки, вызванной невозможностью одновременно обнулить таймеры TIM2 и TIM3. Допустим, в течение времени после обнуления TIM2 и до обнуления TIM3 на вход TIM2 пришло некоторое количество импульсов q . Тогда в первом случае в регистрах CAP1 и CAP3 произойдет захват кода $px1+q$, а во втором случае в регистрах CAP2 и CAP4 – кода $px2+q$. Команда обнуления таймера выполняется за 8 тактов микроконтроллера, что при тактовой частоте 24 МГц составит не более 0,3 мкс. Таким образом, максимальное значение ошибки q при входной частоте $F_{max} = 20 \cdot 10^6$ имп / с составит не более 7. При этом

количество импульсов за измеряемый интервал составит:

$$px = (px2 + q) - (px1 + q) = px2 - px1.$$

Поскольку фактическое значение частоты кварцевого генератора F_{osc} может отличаться от номинального, вводится поправочный коэффициент. С учетом этого окончательное выражение для измерителя количества импульсов за единицу времени равно:

$$fx = px * 2 * F_{osc} / 24.$$

В подключаемом к измерительному блоку персональном компьютере используется специализированное программное обеспечение. Его основными функциями являются:

- инициализация аппаратной части волоконно-оптической дозиметрической системы;
- тестирование и подготовка к работе аппаратной части волоконно-оптической дозиметрической системы;
- настройка параметров, определяющих режимы измерения (периодичность опроса);
- преобразование числа импульсов в единицу времени, поступающих с выхода микроконтроллера, в параметр активности источника ионизирующего излучения;
- измерение и фиксация активности источника на выходе хроматографической колонны;
- отображение в виде графика зависимости активности ИИИ от времени;

- сохранение результатов измерения в файл.

Интерфейс программного обеспечения состоит из следующих компонентов:

• Вкладка «Калибровка». На данной вкладке осуществляется проверка работоспособности и калибровка системы для каждого типа сенсорного элемента. Здесь же осуществляется выбор сенсорного элемента (волокно, кристаллический или жидкий сцинтиллятор) и калибровка «темнового» значения числа импульсов и значения активности.

• Вкладка «Настройка». На данной вкладке осуществляется настройка режимов измерений активности, в частности, времени измерения и периодичности измерений.

• Вкладка «Измерение». На данной вкладке в виде графика отображаются результаты измерений активности в зависимости от времени.

• Вкладка «Результаты измерений». На данной вкладке осуществляется выбор режима сохранения результатов в виде различных типов файлов.

В качестве предварительной оценки работоспособности разработанной оптоволоконной дозиметрической системы определялось количество фотонов, поступающих на вход фотоприемника при номинальных режимах ионизирующего излучения на выходе хроматографической колонны.

В качестве исходных данных выступают:

1) Плотность потока бета-частиц, которая может достигать $F = 10^6$ част/см²*сек;

2) Сцинтилляционная эффективность $\eta = 7100$ фотонов на МэВ;

3) Число фотонов, которые захватываются волокном, от общего числа генерируемых фотонов $\alpha = 2\%$;

4) Длина активной части сцинтилляционного волокна $L = 40$ см;

5) Диаметр волокна $d = 0,25$ мм;

6) Ослабление на стыках волокон $n = 100$ раз;

7) В качестве исследуемого изотопа выбран Sr⁹⁰ (E=546 КэВ).

В результате расчетов получены следующие значения:

1) Площадь облучаемой поверхности $S = L \cdot d = 1$ см²;

2) Число электронов, пролетающих через площадь облучения в единицу времени

$$N_s = F \cdot S = 10^6 \text{ с}^{-1};$$

3) Число фотонов, рождаемых одним электроном с энергией E в единицу времени

$$N_e = h \cdot E = 3876 \text{ с}^{-1}.$$

4) Число фотонов, рождаемых в волокне в единицу времени $N_f = N_e \cdot N_s = 2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$;

5) Число фотонов, достигающих фотопри-

емника (с учетом потерь на стыке волокон) в единицу времени $N_{ph} = N_f \cdot \alpha / n = 4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, расчеты подтверждают эффективность рассматриваемой конструкции, поскольку число фотонов, достигающих фотоприемника в единицу времени, лежит в пределах его динамического диапазона (от 100 до $12 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана оптоволоконная дозиметрическая система, использующая в качестве чувствительного элемента сцинтилляционное волокно. Конструкция сенсорного элемента предполагает его размещение на хроматографической колонне и непрерывный контроль уровня радиоактивного излучения в процессе выделения радиоактивных изотопов.

Основные технические характеристики аппаратной части разработанной системы следующие:

1) Диапазон измеряемых активностей – от 1 до 50 Ки;

2) Точность измерения активности – 20%;

3) Периодичность обновления информации об активности источника ионизирующего излучения на выходе хроматографической колонны – 10 минут;

4) Отображение информации – в виде графика распределения активности источника ионизирующего излучения на выходе хроматографической колонны во времени.

5) Время готовности к работе – не более 10 минут;

6) Электропитание разрабатываемого дозиметра – от источника переменного напряжения $220 \pm 10\%$ В;

7) Максимальный входной ток – не более 2 А;

Максимальная потребляемая мощность – 400 Вт;

9) Потребляемая мощность в рабочем режиме – не более 200 Вт.

После завершения предварительных испытаний предполагается использование данной дозиметрической системы для контроля технологического процесса разделения изотопов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. US5313065 Fiber optic radiation monitor / Reed, Stuart E. (Homeworth, OH), 1994,
2. Pat. US8183534 Scintillating fiber dosimeter array /

Lacroix, Frederic (Montreal, CA), Beaulieu, Luc (Quebec, CA), Beddar, Sam (Houston, TX, US), Guillot, Mathieu (Quebec, CA), Gingras, Luc (Quebec, CA), Archambault, Louis (Houston, TX, US), 2012, 3. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика: теория и практика. М.: Кудиц-Образ, 2006. 320 с.

FIBER OPTIC DOSIMETRY SYSTEM BASED ON SCINTILLATION OPTICAL FIBER

© 2013 S.G. Novikov¹, A.A. Chertoriysky², A.V. Berintsev¹

¹ Research Technological Institute of Ulyanovsk State University

² Ulyanovsk Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov, RAS

We propose a fiber optic dosimetry system that comprises sensor element made of polymer scintillation fiber adjusted to the photodetector through a transport optical fiber. The photodetector signal is processed by a microcontroller system and converted into the values of radiation source activity. The fiber optic dosimetry system is employed to measure activity of the ionizing radiation sources within the selected local segment of a chromatographic column. The latter is used to separate mixtures of radioactive isotopes into components employing different rates at which they propagate through a sorbent. Fiber optic dosimetry system performs automated measurement of activity of ionizing radiation source and storage of measurement data.

Key words: dosimetry system, source of ionizing radiation, scintillation fiber.

Sergey Novikov, Candidate of Technics, Head of Laboratory of Solid State Electronics. E-mail: novikovsg@ulsu.ru
Alexey Chertoriysky, Candidate of Technics, Deputy Director of. E-mail: a-tchertor@yandex.ru.
Alexey Berintsev, Engineer, Graduate Student of Ulyanovsk State Technical University, E-mail: berints@mail.ru