

УДК 539.1.074.3

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ВОЛОКОННОГО РАДИОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТЕЙ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗОТОПА ^{63}Ni

© 2014 С.Г. Новиков¹, А.В. Беринцев¹, В.В. Светухин¹, А.С. Алексеев¹,
А.А. Черторийский², Н.Н. Андрейчук³, Р.А. Кузнецов³

¹ Научно-исследовательский технологический институт Ульяновского государственного университета

² Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

³ ОАО «ГНЦ НИИАР», г.Дмитровград

Поступила в редакцию 16.12.2014

Разработан экспериментальный образец оптоволоконного радиометра на базе сцинтилляционного оптического волокна «Saint-Gobain Crystals» BSF-60, предназначенный для измерения относительной радиоактивности плоских источников ионизирующего излучения (ИИИ) на основе изотопа ^{63}Ni . Проведены экспериментальные исследования чувствительности дозиметра в диапазоне активностей источника до 100 мКи, показавшие, что зависимость скорости счета импульсов на выходе радиометра пропорциональна относительной радиоактивности ИИИ на основе изотопа ^{63}Ni .

Ключевые слова: волоконный дозиметр, источник ионизирующего излучения, сцинтилляционное оптическое волокно.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение относительных радиоактивностей источников ионизирующего излучения в настоящее время реализуется многими непрямыми методами, в том числе и сцинтилляционными, основанными на измерении активности источника в условиях, полностью идентичных предварительно проведенным измерениям первичного стандарта с известной активностью. Данные методы применяются для решения широкого круга научных, технических, технологических и медико-биологических задач [1,2]. Однако эти методы и задачи требуют наличия достаточно сложной и дорогой измерительной техники, специальных методик измерений и условий эксплуатации, что сдерживает их широ-

кое распространение в отраслях, связанных с использованием радионуклидов.

С появлением новых типов сцинтилляторов, например, в виде оптических волноводов, высокочувствительных фотоприемников и построенных на их основе детекторов, радиометров и дозиметров [3] расширяется область применений подобных приборов, снижаются затраты и упрощаются методики измерений.

Известные волоконно-оптические радиационные датчики на основе сцинтилляционных волокон [4-7] 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 в значения, относительной радиоактивности ИИИ. При этом сцинтилляционные волокна могут быть распределены в трехмерном пространстве и их продольные оси могут быть ориентированы в разных направлениях относительно оси падающего излучения.

Одной из важных задач производства ИИИ на основе изотопа ^{63}Ni является измерение активностей конечного изделия. При этом в большинстве случаев используются радиометрические установки на базе УИМ2-2 с различными блоками детектирования. Определение актив-

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники НИТИ. E-mail: novikovsg@ulsu.ru

Беринцев Алексей Валентинович, инженер НИТИ, аспирант УлГТУ. E-mail: berints@mail.ru

Светухин Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИТИ. E-mail: Slava@sv.uven.ru

Алексеев Александр Сергеевич, стажер-исследователь НИТИ. E-mail: granik@ya.ru

Черторийский Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора УФИРЭ по научной работе. E-mail: a-tchertor@yandex.ru

Кузнецов Ростислав Александрович, кандидат химических наук, директор Отделения радионуклидных источников и препаратов АО «ГНЦ НИИАР».

E-mail: R-Kuznetsov@niiar.ru

Андрейчук Николай Николаевич, старший научный сотрудник АО «ГНЦ НИИАР». E-mail: orip@niiar.ru

ности радионуклида ^{63}Ni в источниках бета-излучения проводится методом компаратора. Для этого изготавливаются эталонные источники, активность ^{63}Ni на которых определяется из гравиметрических измерений при электрохимическом осаждении ^{63}Ni и изотопного состава используемого препарата. Измеряется скорость счета эталонных источников в зависимости от активности ^{63}Ni . С использованием полученной зависимости определяется активность изготавливаемых источников. С целью упрощения аппаратного обеспечения и методики измерений, а также для существенного снижения внешних электромагнитных шумов при проведении измерений разработан сцинтилляционный волоконный радиометр для измерения активностей ИИИ на основе изотопа ^{63}Ni .

ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Наиболее простой и эффективной для указанного применения является, на наш взгляд, конструкция сцинтилляционного волоконного радиометра, показанная на рисунке 1. Система состоит из сенсорного элемента, 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 Crystals» 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 8 фотонам на кэВ энергии минимально ионизирующей частицы. Однако волокном захватывается не более 4 % всех произведенных фотонов.

Стандартным материалом для оболочки является полиметилметакрилат $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ (ПММА). Его плотность 1,2 г/см³, 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 ИИИ. Поток β -излучения, попадая на волокно, преобразуется в

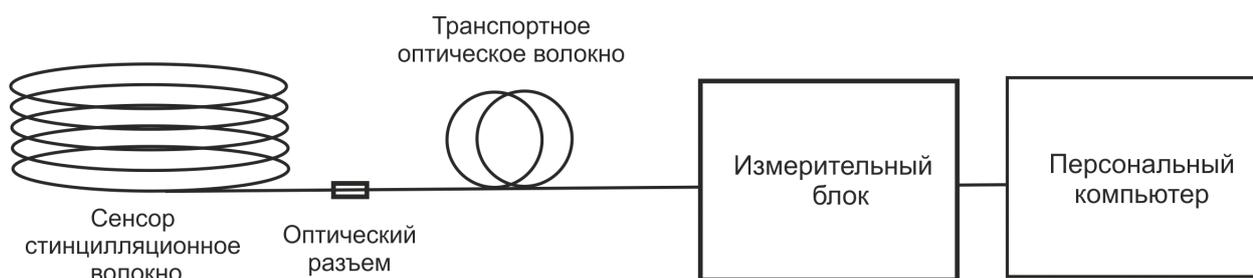


Рис. 1. Структурная схема сцинтилляционного волоконного радиометра для измерения активностей источников ионизирующего излучения на основе изотопа ^{63}Ni

Таблица 1. Основные характеристики волокна BSF-60

Марка волокна	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

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.

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 (с нанесенным зеркальным отражающим слоем) остается свободным. На выходе из проточек волокно дополнительно зафиксировано клеем. Длина сцинтилляционного волокна составляла 55 см.

В верхней и нижней крышке сделаны отверстия (на рисунке не показаны), позволяющие поместить внутрь сенсорного элемента измеряемый источник. Для обеспечения одинаковой геометрии размещения источников относительно сенсора используется металлическая бленда. Данная бленда является частью корпуса сенсорного элемента (формируется краями отверстий в верхней и нижней крышках сенсорного элемента).

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 оптичес-

кого волокна, при передаче оптической мощности будут наблюдаться потери. Величину потерь (в дБ) можно приблизительно оценить по формулам [8]:

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

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

где DP_{NA} , DP_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).

Фотоприемник измерительного блока оптоволоконного радиометра построен на основе модуля COUNT-250B-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.

В подключаемом к измерительному блоку персональном компьютере используется специ-

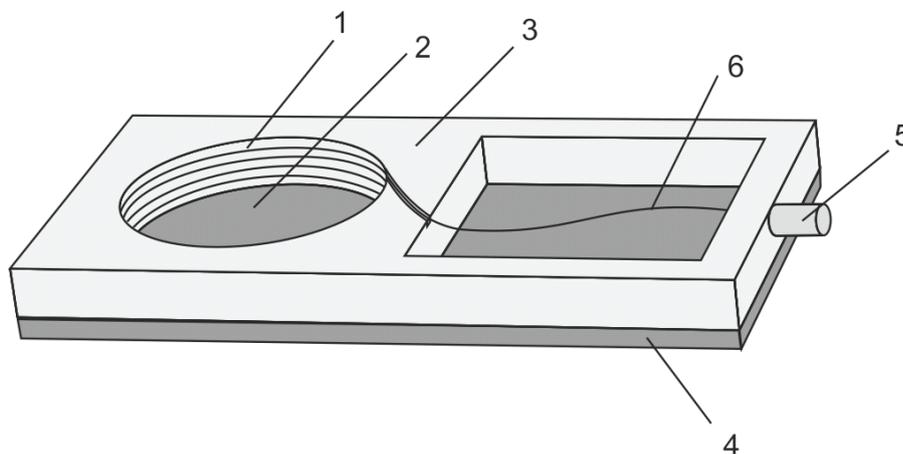


Рис. 2. Конструкция сенсорного элемента (верхняя крышка не показана):

- 1 – сцинтилляционное волокно, 2 – отверстие в корпусе, 3 – корпус,
4 – крышка, 5 – оптическая розетка, 6 – выходной конец волокна

ализированное программное обеспечение. Его основными функциями являются:

- инициализация аппаратной части;
- тестирование и подготовка к работе аппаратной части;
- настройка параметров, определяющих режимы измерения (периодичность опроса);
- преобразование числа импульсов в единицу времени, поступающих с выхода микроконтроллера, в параметр активности ИИИ;
- измерение и фиксация активности источника;
- отображение в виде графика зависимости активности ИИИ от времени;
- сохранение результатов измерения в файл.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований разработанного оптоволоконного радиометра в «ОАО ГНЦ НИИАР» (г. Димитровград) были изготовлены источники бета-излучения на основе ^{63}Ni . Источники получены электрохимическим осаждением металлического никеля на никелевую фольгу, толщиной 50 мкм и площадью 1 см² (1x1 см) из сернокислого электролита состава: 0,1...0,16 моль/л NiSO_4 + 0,15 моль/л Na_2SO_4 + 0,65 моль/л H_3BO_3 (рН=5). Было изготовлено 4 образца с активностями 22,8, 22,5, 26,2, 26,6 мКи. Измерение активностей проводилось при помощи радиометрической установки на базе УИМ2-2 компараторным методом. Для ^{63}Ni энергия испускаемых бета электронов варьируется в диапазоне от 0 до 66,7 кэВ со средним значением 17,1 кэВ [9].

При проведении измерений с использованием разработанного экспериментального образца сцинтилляционного волоконного радиометра источники на основе ^{63}Ni располагались на боковой поверхности специального пластикового цилиндра высотой 40 мм и диаметром 30 мм и

фиксируются при помощи двухстороннего скотча. На рисунке 3 приведено расположение элементов в эксперименте. Пластиковый цилиндр 3, на боковой поверхности которого размещены источники на основе ^{63}Ni 4, на высоте 5 мм от нижнего основания размещался по центру круглого отверстия 2 корпуса сенсорного элемента 1, диаметр которого составляет 60 мм, таким образом, что активные поверхности источников были обращены к виткам сцинтилляционного волокна, расположенных на внутренней поверхности круглого отверстия корпуса сенсорного элемента. Сенсорный элемент содержал 3 витка волокна. Высота намотки составляла 15 мм. Расстояние от ИИИ до сцинтилляционного волокна составляло приблизительно 12 мм. Посредством оптического разъема 6 и оптоволоконного кабеля 7 сенсорный элемент соединялся с измерительным блоком.

При проведении эксперимента источники последовательно удалялись с поверхности цилиндра, тем самым реализовывалось изменение общей активности источников. При этом сенсорный элемент и источники помещались в светонепроницаемый контейнер 5 для снижения уровня темнового счета, который составил 25-35 имп/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментальных исследований определялась чувствительность дозиметра в диапазоне активностей источника до 100 мКи. На рисунке 4 приведена полученная в результате экспериментов зависимость скорости счета импульсов от активности источников. Полученные экспериментальные точки в пределах абсолютной приборной погрешности измерения (± 10 имп/с) хорошо аппроксимируются прямой. Данные результаты можно использовать при проведении калибровки разработанного эксперимен-

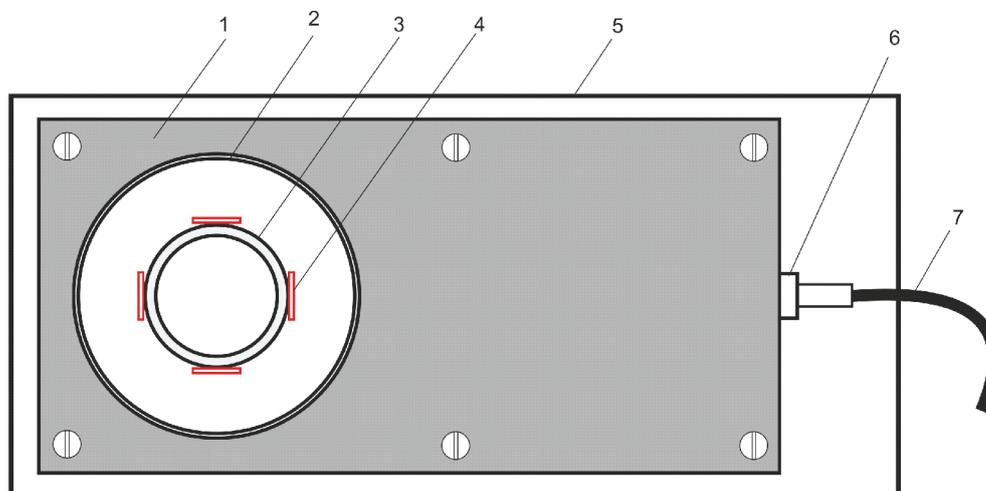


Рис. 3. Схема эксперимента

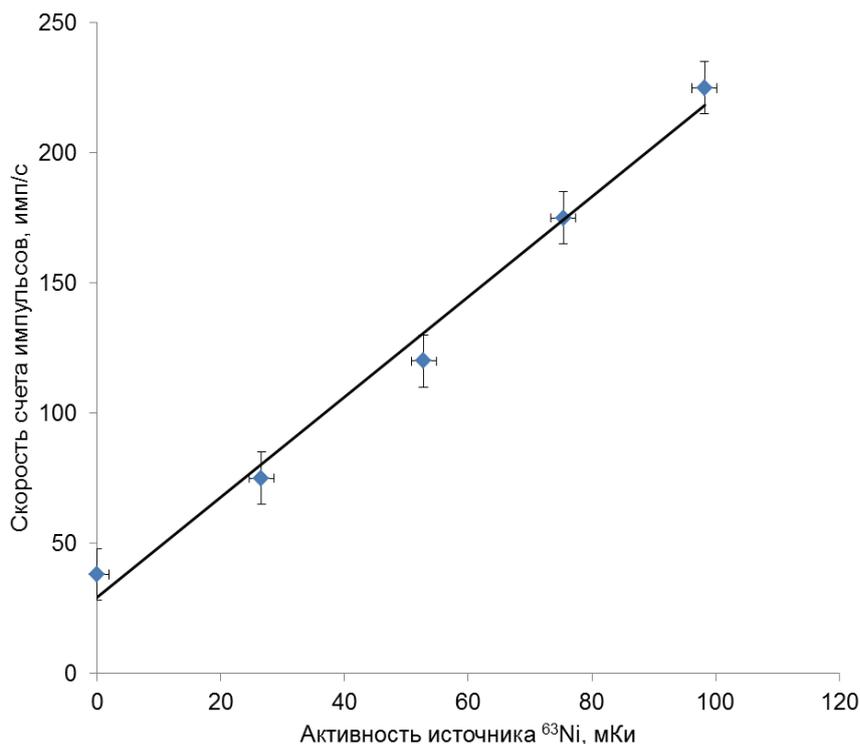


Рис. 4. Зависимость скорости счета от активности ИИИ на основе ^{63}Ni

тального образца радиометра для проведения измерений в единицах относительной радиоактивности. В соответствии с проведенной аппроксимирующей прямой и с учетом приборных погрешностей чувствительность прибора в данной геометрии может быть на уровне 10-12 мКи. При оптимизации сенсорного элемента непосредственно для определения относительной радиоактивности плоских никелевых ИИИ, а также снижении темновой скорости счета до 10-15 имп/с за счет использования светозащищенного волокна возможно значительное увеличение чувствительности прибора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований экспериментального образца волоконного радиометра показана возможность использования сцинтилляционных оптических волокон для измерения активностей ИИИ на основе изотопа ^{63}Ni . Исследования чувствительности показали, что прибор устойчиво чувствителен к источникам с активностью порядка 20 мКи и выше, а зависимость скорости счета от активности источников на основе ^{63}Ni имеет линейный вид, что в дальнейшем может быть использовано при проведении калибровки прибора. В случае проведения калибровки и оптимизации конструкции сенсорного элемента прибор может быть использован для измерения активностей готовых источников в пределах погрешности порядка 10-15 %.

При этом, используемое в сенсоре сцинтилляционное оптическое волокно рассчитано на более высокие значения дозовых нагрузок, а счетчик фотонов позволяет выполнять счет до $12 \cdot 10^6$ имп/с, что позволит в дальнейшем провести эксперименты с источниками с более высокими активностями. Прибор позволяет проводить также непрерывные измерения, что может быть использовано при проведении технологических операций получения ИИИ электрохимическим методом.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штольц В., Бернхардт Р. Дозиметрия ионизирующего излучения [пер. с нем. Я.А. Эйдуса; под ред. К.К. Шверца]. Рига: Зинатне, 1982.
2. Радиационная медицина. Т. 2. Радиационные поражения человека [под ред. А.К. Гуськовой и Г.Д. Селидовкина; под общей ред. Л.А. Ильина]. М.: ИздАТ, 2001. 419 с.
3. Fiber-optic dosimeter based on radiation-induced attenuation in P-doped fiber: suppression of post-irradiation fading by using two working wavelengths in visible range / Alexander L. Tomashuk, Mikhail V. Grekov, Sergei A. Vasiliev, and Vyacheslav V. Svetukhin // Opt. Express **22**, 16778-16783 (2014).
4. Пат. US5313065 Fiber optic radiation monitor / Reed, Stuart E. (Homeworth, OH), 1994.
5. Пат. 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.

6. Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В. Оптоволоконная дозиметрическая система на базе сцинтилляционного оптического волокна // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №4(5). С.1017-1023.
7. Патент РФ № 138047 Оптоволоконная дозиметрическая система / Новиков С.Г., Коробко Д.А., Беринцев А. В., Черторийский А.А. Заявка: 2013147952/28, 28.10.2013 Дата начала отсчета срока действия патента: 28.10.2013 Опубликовано: 27.02.2014;
8. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика: теория и практика. М.: Кудиц-Образ, 2006. 320 с.;
9. Friedlander G., Macias E.S., Kennedy J.W. Nuclear and Radiochemistry. Wiley, 1981. ISBN: 9780471862550.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION SCINTILLATING OPTICAL FIBER-BASED RADIOMETER FOR MEASURING THE ACTIVITIES OF ⁶³Ni ISOTOPE RADIATION SOURCES

© 2014 S.G. Novikov¹, A.V. Berintsev¹, V.V. Svetukhin¹, A.S. Alexeyev¹, A.A. Chertoriysky², N.N. Andreychuk³, R.A. Kuznetsov³

¹ Research Institute of Technology of Ulyanovsk State University

² Ulyanovsk Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotel'nikov of RAS

³ Joint Stock Company "State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors", Dimitrovgrad

An experimental sample of radiometer based on the «Saint-Gobain Crystals» BSF-60 scintillating optical fiber has been developed aimed at measuring the activities of flat ionizing radiation sources based on ⁶³Ni isotope. An experimental study of the dosimeter sensitivity has been implemented within the activities range of the radiation source up to 98 mCi demonstrating that the count rate at the radiation meter output is proportional to the relative radiation activity of the ionizing radiation source based on ⁶³Ni isotope.

Keywords: dosimetry system, source of ionizing radiation, scintillation fiber.

Sergey Novikov, Candidate of Technics, Head of Laboratory of Solid State Electronics of Research Institute of Technology.

E-mail: novikovsg@ulsu.ru

Alexey Berintsev, Engineer of Research Institute of Technology, Postgraduate Student of Ulyanovsk State Technical University.

E-mail: berints@mail.ru

Vyacheslav Svetukhin, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Leading Researcher at the Research Institute of Technology. E-mail: Slava@sv.uven.ru

Alexander Alexeyev, Trainee Researcher at the Research Institute of Technology. E-mail: granik@ya.ru

Alexey Chertoriysky, Candidate of Technics, Associate Professor Deputy Director of UFIRE.

E-mail: a-tchertor@yandex.ru.

Rostislav Kuznetsov, Candidate of Chemistry, Director of Radioisotope Department of Joint Stock Company "State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors".

E-mail: R-Kuznetsov@niar.ru

Nikolay Andreychuk, Senior Researcher at Joint Stock Company "State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors". E-mail: orip@niar.ru