

ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 539.1.074

В.В. Приходько, С.Г. Новиков, А.С. Алексеев, А.В. Беринцев, А.С. Кадочкин,
В.В. Светухин, А.И. Сомов

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАДИОХРОМНОЙ ПЛЕНКИ GAFCHROMIC EBТЗ¹

Приходько Виктор Владимирович, кандидат физико-математических наук, окончил физико-математический факультет филиала Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в г. Ульяновске, старший научный сотрудник Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета. Область научных интересов: физика твердого состояния, оптика, телекоммуникации. [e-mail: v_prikhodko@mail.ru].

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, окончил физико-технический факультет филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Ульяновске, начальник лаборатории твердотельной электроники НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: микроэлектроника, негatronика, оптоэлектроника, полупроводниковые приборы с положительной обратной связью. [e-mail: novikovsg@ulsu.ru].

Алексеев Александр Сергеевич, аспирант УлГУ, окончил инженерно-физический факультет УлГУ, стажер-исследователь НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: полупроводниковые приборы, оптоэлектроника, микроэлектроника. [e-mail: granik@ya.ru].

Беринцев Алексей Валентинович, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного политехнического института, инженер НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: оптоэлектроника, микроэлектроника, полупроводниковые приборы. Имеет научные публикации и изобретения в области автоматизации измерений и исследования оптоэлектронных приборов. [e-mail: berints@mail.ru].

Кадочкин Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, окончил физико-технический факультет УлГУ, старший научный сотрудник НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: оптика, плазмоника. [e-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru].

Светухин Вячеслав Викторович, доктор физико-математических наук, окончил физико-технический факультет филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Ульяновске, профессор, ведущий научный сотрудник НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Область научных интересов: дефектообразование в полупроводниках, радиационная физика и технология. Имеет статьи в области физики полупроводников, физического материаловедения. [e-mail: slava@sv.uven.ru].

Сомов Андрей Ильич, кандидат физико-математических наук, окончил физико-технический факультет филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Ульяновске, старший научный сотрудник лаборатории

твердотельной электроники НИТИ им. С.П.Капицы УлГУ. Область научных интересов: полупроводниковые приборы, оптоэлектроника, вероятностные процессы. [e-mail: andrey_somov@mail.ru].

Аннотация

Предложена система мониторинга поглощенной дозы ионизирующего излучения, содержащая персональный дозиметр поглощенной дозы и считыватель (систему считывателей). В качестве сенсорного материала дозиметра используется фотохромная пленка Gafchromic EBT3, чувствительная как к рентгеновскому, так и к гамма-излучению. Предлагается оригинальная конструкция детектора, содержащая светодиод, два фотоприемника, расположенные в одной плоскости, и делитель оптического потока с зеркальным покрытием. Над одним из фотоприемников размещается сенсорный элемент, изменение оптической прозрачности которого несет информацию о поглощенной дозе. Для передачи данных об измеренной дозе используется радиоканал и технология радиочастотной идентификации (RFID). В качестве считывателей информации о накопленной дозе возможно использование мобильных, настольных и стационарных RFID-считывателей, в том числе интегрированных в информационные системы предприятия. Используемый в персональном дозиметре сенсор дает возможность производить измерения поглощенной дозы непрерывно в течение длительного срока. Кроме того, дозиметр не содержит источник питания, и необходимая для работы энергия поступает в моменты взаимодействия персонального дозиметра со считывателем, что обеспечивает снижение массогабаритных показателей и возможность реализации дозиметра в компактном форм-факторе.

Приводятся данные модельных расчетов и экспериментальных исследований, проведенных с целью обоснования возможности построения детектора на основе радиохромной пленки Gafchromic EBT3.

Ключевые слова: система мониторинга, персональная дозиметрия, дозиметр поглощенной дозы, радиохромные пленки, Gafchromic EBT3, радиочастотная идентификация, RFID, рентгеновское излучение, гамма-излучение, численное моделирование, оптическая спектроскопия.

A SYSTEM OF MONITORING THE INDIVIDUAL ABSORBED DOSES OF IONIZING RADIATION BASED ON A GAFCHROMIC EBT3 RADIOCHROME FILM

Viktor Vladimirovich Prikhodko, Candidate of Science in Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Physics and Mathematics of the Ulyanovsk Branch of Lomonosov Moscow State University; Senior Staff Scientist at the S.P. Kapitsa Research Institute of Technology at Ulyanovsk State University; his research interests include solid state physics, optics, telecommunications. e-mail: vvp@ulsu.ru.

Sergei Gennadievich Novikov, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Faculty of Physics and Mathematics of the Ulyanovsk Branch of Lomonosov Moscow State University; Head of the Solid State Electronics Laboratory at the S.P. Kapitsa Research Institute of Technology at Ulyanovsk State University; his research interests include microelectronics, negatronics, optoelectronics, semiconductor devices with positive feedback. e-mail: novikovsg@ulsu.ru.

Aleksandr Sergeevich Alekseev, Postgraduate Student of Ulyanovsk State University; graduated from the Faculty of High Technology Physics and Engineering of Ulyanovsk State University; Research Assistant at the S.P. Kapitsa Research Institute of Technology at Ulyanovsk State University; his research interests include semiconductor devices, optoelectronics and microelectronics. e-mail: granik@ya.ru.

Aleksei Valentinovich Berintsev, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Engineer of the S.P. Kapitsa Research Institute of Technology at Ulyanovsk State University; his research interests include optoelectronics, microelectronics, semiconductor devices; an author of articles and inventions in the field of measurement automation and optoelectronic devices research. e-mail: berints@mail.ru.

Aleksei Sergeevich Kadochkin, Candidate of Science in Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of Ulyanovsk State University; Senior Staff Scientist of the S.P. Kapitsa Research Institute of Technology at Ulyanovsk State University; his research interests include optics, plasmonics. e-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru.

Viacheslav Viktorovich Svetukhin, Doctor of Science in Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of the Ulyanovsk Branch of Lomonosov Moscow State University; Professor, Leading Staff Scientist of the S.P. Kapitsa Research Institute of Technology at Ulyanovsk State University; his research interests include defect formation in semiconductor devices, radiation physics and technology; an author of

articles in the field of semiconductor physics and physical material science. e-mail: slava@sv.uven.ru.

Andrei Ilich Somov, Candidate of Science in Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Physics and Engineering of the Ulyanovsk Branch of Lomonosov Moscow State University; Senior Staff Scientist of the Solid-State Electronics Laboratory at the S.P. Kapitsa Research Institute of Technology at Ulyanovsk State University; his research interests include semiconductor devices, optoelectronics, probabilistic processes. e-mail: andrey_somov@mail.ru.

Abstract

A system for monitoring the absorbed dose of ionizing radiation containing a personal dosimeter of the absorbed dose and a reader (system of readers) is proposed. The sensor material of the dosimeter is a Gafchromic EBT3 photochromic film, sensitive to both X-ray and gamma radiation. An original detector design containing an LED, two photodetectors located in one plane, and an optical flux divider with a mirror coating is proposed. Above one of the photoreceivers, a sensory element is placed, the change in optical transparency of which carries information about the absorbed dose. To transmit data on the measured dose, the radio channel and RFID technology are used. As readers of the data on the accumulated dose, mobile, desktop and stationary RFID readers can be used, including those integrated into enterprise information systems. The sensor used in the personal dosimeter makes it possible to measure the absorbed dose continuously for a long period of time. In addition, the dosimeter does not contain a power source, and the energy necessary for operation comes at the moments of interaction of the personal dosimeter with the reader, which ensures a reduction in the mass-dimensions and the possibility of implementing the dosimeter in a compact form factor.

The results of model calculations and experimental studies carried out to justify the possibility of constructing a detector based on the Gafchromic EBT3 radiochromic film are presented.

Key words: monitoring system, personal dosimetry, dosimeter of absorbed dose, radiochromic films, Gafchromic EBT3, radio frequency identification, RFID, X-ray radiation, gamma radiation, numerical modeling, optical spectroscopy.

ВВЕДЕНИЕ

По мере того как радиационные технологии находят новые сферы применения, информация о дозе ионизирующего излучения, полученной человеком от различных источников радиации, становится важным регулирующим фактором в массовом обеспечении безопасности жизни и здоровья населения. В настоящее время основной вклад в поглощенную дозу, получаемую от техногенных источников вносят профилактические исследовательские и терапевтические медицинские процедуры с применением источников ионизирующего излучения, сканеры и детекторы аэропортов и вокзалов, а также источники, сосредоточенные на предприятиях ядерной промышленности и энергетики и в хранилищах отработанного ядерного топлива.

Существующие в настоящее время решения по измерению поглощенной дозы либо относятся к прямопоказывающим дозиметрам и имеют встроенный источник питания (функцией измерения накопленной дозы обладает, например, ряд бытовых дозиметров), что накладывает ограничение на время непрерывной работы устройства, либо относятся к непрямопоказывающим дозиметрам, требующим совершения ряда сложных технологических процедур для прочтения показаний. К последним относятся поглощающие таблетки типа ТЛД-500К [1, 2], которые используются в термолюминесцентном методе определения дозы; сюда же можно отнести сенсоры на основе оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ-сенсоры) [3, 4]. Кроме того, указанные решения относятся к локальным и не предна-

значены для организации распределенных информационных систем для мониторинга накопленных доз.

Непрерывный мониторинг поглощенной дозы при прохождении медицинских процедур, авиаперелетах и работе, связанной с радиационной опасностью, требует надежных и удобных в эксплуатации средств измерения, что делает актуальной проблему разработки персональных малогабаритных носимых дозиметров поглощенной дозы и распределенных дозиметрических систем для считывания и хранения персональной информации о накопленной дозе.

Наиболее важными задачами в этом направлении являются поиск эффективного сенсорного материала и технологии преобразования данных о накопленной дозе, обеспечение оперативного и доступного метода считывания, уменьшение массогабаритных показателей персонального измерителя и расширение функциональных возможностей системы в целом. Оптимальным вариантом получения информации о поглощенной дозе представляется использование мобильного устройства с бесконтактной технологией NFC/RFID либо распределенной сети бесконтактных считывателей с возможной интеграцией с информационными системами предприятия.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное обоснование основных принципов построения системы мониторинга поглощенной дозы, включающей персональный энергонезависимый дозиметр поглощенной дозы и бесконтактный считыватель (либо систему считывателей).

1 ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Предлагаемая система мониторинга поглощенной дозы строится на основе малогабаритного персонального дозиметра поглощенной дозы ионизирующего излучения с радиочастотным каналом передачи информации и распределенной сети считывателей на базе мобильных устройств и персональных компьютеров, образующих единую информационную систему обработки и накопления результатов измерений.

Структурная схема системы мониторинга приведена на рисунке 1.

Система может быть построена как в локальном, так и распределенном варианте. Возможен вариант реализации системы, при котором обеспечивается отслеживание изменений персональной накопленной дозы при перемещении контролируемого субъекта по контролируемой территории за счет использования множества считывателей, установленных в различных местах и фиксирующих идентификатор персонального измерителя поглощенной дозы, дату, время и место при выполнении каждого акта считывания.

В качестве сенсорного материала дозиметра поглощенной дозы перспективной представляется фотохромная пленка Gafchromic EBT3 [5]. Компанией Ashland производится ряд пленок под маркой Gafchromic, предназначенных для регистрации гамма- и рентгеновских лучей, пучков электронов, протонов, ионов, α -частиц и нейтронов. Активный компонент пленок состоит из кристаллов радиационно-чувствительного мономера LiPCDA субмикронных размеров. Под воздействием ионизирующего излучения запускается реакция полимеризации, при этом количество полимера и глубина изменения цвета пропорциональна поглощенной дозе в активном слое.

Пленка Gafchromic EBT3 обладает универсальной чувствительностью в различных диапазонах энергий (рентгеновском и гамма) и хорошей чувствительностью

в области средних уровней доз (0,1–10 Гр), где пленка обладает практически линейным откликом. Радиохромная пленка активно применяется в лучевой терапии для решения задач радиационного контроля, в частности, как координатно-чувствительный дозиметр для контроля качества при радиотерапии с модулированной интенсивностью (IMRT) [6, 7]. В качестве метода регистрации дозы, рекомендованного производителем, используется анализ растрового изображения облученных образцов пленки, полученного с помощью планшетного сканера [8]. Наилучший отклик экспонированной пленки может быть получен при измерении коэффициента пропускания на красной длине волны в диапазоне пика поглощения полимера, т. е. около $\lambda = 635$ нм.

Изменения в спектрах пропускания после взаимодействия сенсора с ионизирующим излучением являются необратимыми. Это обстоятельство позволяет говорить о возможности использования пленочных сенсоров для мониторинга поглощенной дозы.

Предлагаемый персональный дозиметр поглощенной дозы ионизирующего излучения содержит детектор (рис. 2), представляющий собой закрытые светонепроницаемой оболочкой два фотоприемника, расположенные на диэлектрической подложке. Фоточувствительная область одного из фотодиодов покрыта чувствительным к накопленной дозе пленочным сенсором, а фоточувствительная область второго – компенсатором с коэффициентом пропускания, близким к коэффициенту пропускания необлученного пленочного сенсора. На фотодиоды падает оптическое излучение от расположенного в одной плоскости с ними светодиода, излучающего в нескольких спектральных диапазонах. Для этих целей используется делитель оптического потока с внешним зеркальным покрытием. Наличие двух фотоприемников позволяет исключить зависимость их параметров от температуры и напряжения за счет использования отношения напряжения на фотопри-

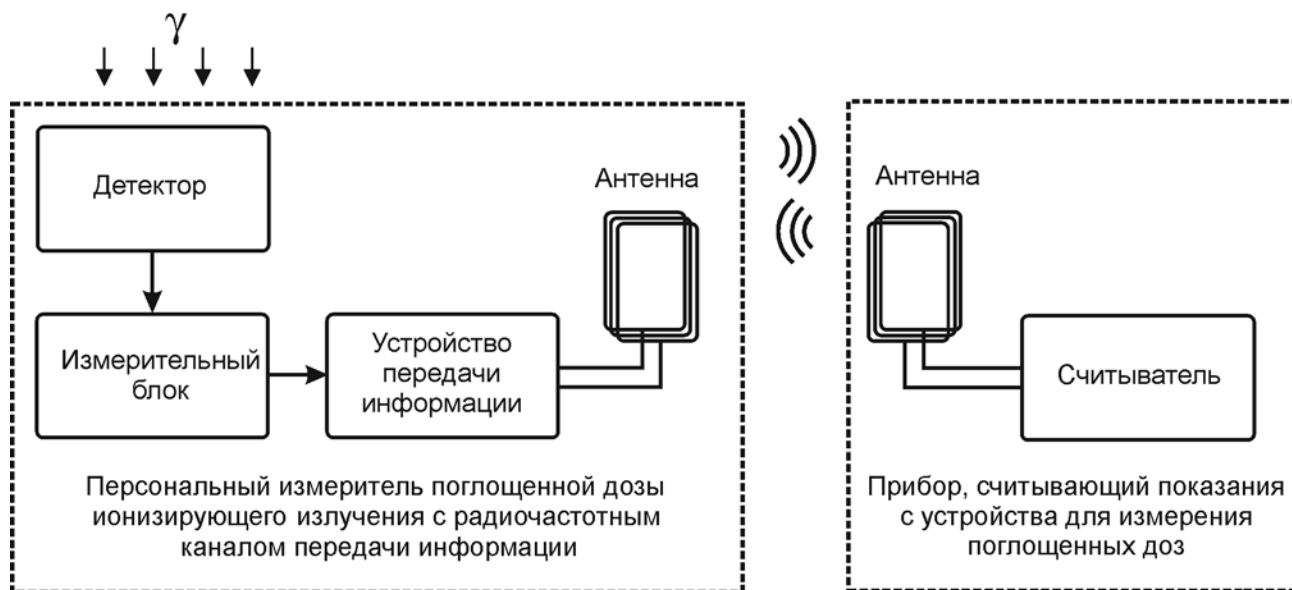


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга поглощенных доз ионизирующего излучения

емнике с сенсором к напряжению на фотопремнике-компенсаторе. Аналогично этому, исключение влияния нестабильности температуры и напряжения на яркость свечения светодиода производится благодаря измерению пропускания не только на основной длине волны 635 нм, но и на опорной длине волны из диапазона длин волн, в котором зависимость от дозы отсутствует.

Предлагаемый детектор на базе пленочного сенсора позволяет осуществлять первичное преобразование измеряемой величины (поглощенная доза излучения) в электрический сигнал, в связи с чем становится возможным передача дозиметрической информации, например посредством радиоканала. При этом важным преимуществом по сравнению с существующими персональными детекторами поглощенного радиационного излучения на основе ТЛД- и ОСЛ-сенсоров является отсутствие необходимости предварительного извлечения сенсорного элемента и проведения данной операции с использованием специального оборудования.

Кроме детектора, персональный дозиметр поглощенной дозы ионизирующего излучения включает в себя измерительный блок и антенну. Антенны используются не только для передачи информации, но и для наведения электромагнитного поля, достаточного для питания персонального измерителя. Для передачи информации может использоваться один из частотных диапазонов RFID: 125–150 кГц; 13,56 МГц; 862–950 МГц и 2,4–5 ГГц. Наиболее предпочтительным с точки зрения соотношения эффективности и стоимости решения представляется диапазон 13,56 МГц.

Все указанные компоненты составляют компактное корпусированное персональное носимое устройство, в котором сохраняется информация о накопленной дозе ионизирующего излучения.

Наличие совместимого радиочастотного канала передачи измеряемой информации позволяет использовать устройство с мобильными или стационарными считывателями (выполненным, например, в форм-факторе ворот), в том числе территориально-распределенными

и объединенными в единую информационную систему.

Предлагаемая система мониторинга поглощенной дозы работает следующим образом.

Перед началом использования проводится калибровка нулевого значения накопленной дозы путем считывания коэффициентов пропускания пленочного сенсорного элемента на двух длинах волн. Для этого дозиметр помещается в электромагнитное поле считывателя, которое наводит электродвижущую силу в антенне устройства, достаточную для питания электронной схемы в течение акта считывания, обработки и передачи информации на считыватель. Вместе с информацией о начальных значениях коэффициентов пропускания в момент первого считывания производится регистрация персонального идентификатора в информационной системе.

В дальнейшем чтение данных с персонального дозиметра поглощенной дозы осуществляется в моменты, когда устройство попадает в поле действия считывателя. При этом в базе данных фиксируются ID, дата, время и величина накопленной дозы, на основании чего в дальнейшем формируется персональный учетный документ о накопленной дозе. Оперативность измерения дозы дает возможность информационной системе в случае превышения разницы между текущими и предыдущими показаниями некоторого порога мгновенно сгенерировать для администратора системы соответствующее уведомление.

Для теоретического и экспериментального обоснования возможности построения детектора на основе радиохромной пленки Gafchromic EBТ3 ниже приводятся данные модельных расчетов и экспериментальных исследований, проведенных авторским коллективом.

2 МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Ранее авторами было выполнено компьютерное моделирование взаимодействия рентгеновского и гамма-излучения с радиохромными пленками Gafchromic EBТ3 [9, 10]. Численный расчет производился методом Монте-Карло с использованием библиотек программного пакета Geant4. Показано, в частности, что наличие в структуре пленки защитных слоев из полиэстера снижает ее чувствительность к ионизирующему излучению приблизительно в полтора-два раза (в зависимости от источника ионизирующего излучения).

Данный результат имеет значение для решения задачи повышения чувствительности разрабатываемого дозиметра. С этой же целью в настоящей работе выполнено компьютерное моделирование детектора и произведен численный расчет оптимальной высоты установки зеркального покрытия над светодиодом и фотоприемниками.

Расчет выполнялся с использованием программной платформы для моделирования прикладных задач Comsol Multiphysics. С этой целью в программном пакете была разработана модель детектора ионизирующего излучения, представленная на рисунке 3. Излу-

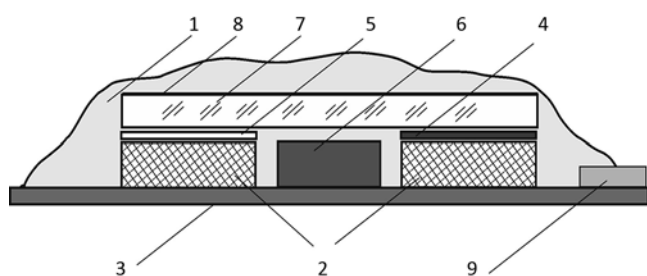


Рис. 2. Детектор: 1 – светонепроницаемая оболочка; 2 – фотоприемники; 3 – диэлектрическая подложка; 4 – чувствительный к накопленной дозе пленочный сенсор; 5 – компенсатор коэффициента пропускания; 6 – источник оптического излучения; 7 – делитель оптического потока; 8 – зеркальное покрытие; 9 – электрический разъем

чающий светодиод моделировался точечным источником, находящимся в центре пластины. Фотоприемники задавались двумя квадратными поверхностями размером 5×5 мм² каждая. Верхняя поверхность является зеркальной, для боковых поверхностей отражение принималось равным 10 %, 50 % и 100 %. Пространство между верхней и нижней поверхностями – среда с показателем преломления 1,5 (стекло).

Для расчета распространения лучей, испущенных точечным источником с ламбертовской диаграммой направленности, использовался программный модуль Ray Optics. Использовались следующие правила для лучей: полное отражение по законам геометрической оптики при попадании на верхнюю зеркальную поверхность; отражение с соответствующим коэффициентом при попадании на боковую поверхность (остальное поглощалось); отражение 50 % при попадании на нижнюю поверхность.

Целью расчета являлось определение доли энергии, приносимой лучами на поверхность фотоприемников, в зависимости от положения зеркала над детектором. Результаты расчета для различных коэффициентов отражения от стенок представлены на рисунке 3.

Из рисунка видно, при коэффициентах отражения от поверхности 10 % и 50 % оптимальная высота зеркальной поверхности составляет величину примерно 2,3 мм, а при зеркальных боковых стенках энергия, получаемая фотоприёмниками, выходит на максимальное значение (насыщение), начиная с толщины 4 мм. В целом доля энергии, попадающей на фотоприёмник, определяется отношением его площади к общей площади поверхности. При этом в случае поглощения боковыми стенками это значение составляет порядка 1 %, а в случае зеркальных стенок может достигать 5 %.

Авторами был поставлен ряд экспериментов с реальными фотоприемниками и RGB-светодиодами (FT1-2PT15-21C/TR8 и FYLS-5050RGB соответственно), показавших, что доли порядка 1 % от общей световой энергии яркого светодиода достаточно для уверенного измерения коэффициента пропускания пленки.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью изучения возможности применения пленки в качестве сенсорного элемента в малогабаритном дозиметрическом устройстве был проведен ряд экспериментов, направленных на решение следующих задач:

- 1) подготовка образцов пленки;
- 2) проверка оптической однородности пленки вдоль всего листа;
- 3) облучение образцов при различных дозах;
- 4) измерение спектров пропускания образцов в широком диапазоне длин волн.

3.1 Подготовка образцов

Стандартный размер пленки составляет 203×254 мм, при этом для малогабаритных дозиметров размер пленочного сенсорного элемента должен быть существенно меньшим. Проблема получения небольших образцов

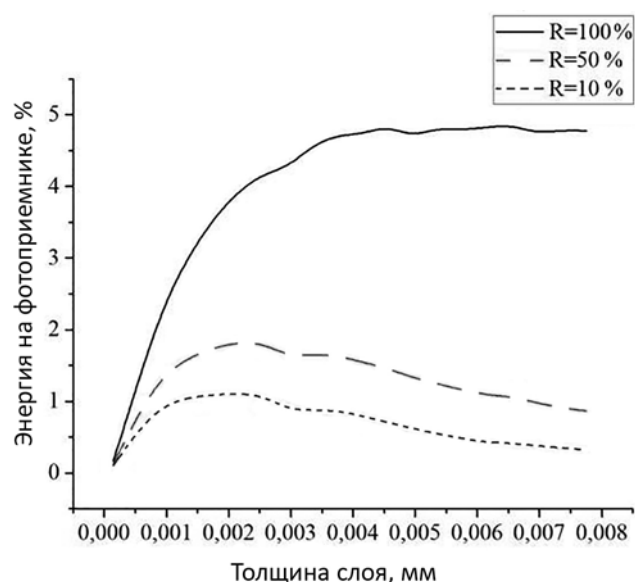


Рис. 3. Зависимость энергии, поступающей на фотоприёмники, от высоты зеркального слоя

пленки Gafchromic EBТ3 заключается в том, что при разрезании механическим способом пленка начинает расслаиваться. При этом даже невооруженным взглядом видны изменения в ее прозрачности, в результате чего пленка становится непригодной для использования в качестве надежного сенсора. Оптимальный результат был получен при использовании лазерной резки. Для разрезания использован лазерный станок Rabbit 6090 SE (RECI S2 100 Вт).

Пленка была разрезана на 80 образцов (10 серий по 8 образцов в каждой серии) с размерами 25×12 мм. Кроме быстроты и точности реза, к преимуществам лазерной резки относится также то, что края образца под действием высокой температуры спекаются, и это исключает дальнейшее расслаивание и воздействие агрессивной среды на активный слой.

Выбор размера 25×12 мм обусловлен параметрами стандартного держателя спектрофотометра, на котором далее измерялись коэффициенты пропускания образцов.

3.2 Проверка оптической однородности пленки

Разброс параметров вдоль пленки может привести к тому, что образцы, вырезанные из различных частей листа, могут оказаться непригодными для совместного использования в экспериментах. С целью исключения данного фактора были проведены исследования однородности оптических свойств пленки. Для 10 серий по 8 образцов в серии были измерены спектры пропускания на спектрофотометре СФ102.

На рисунке 4 представлены усредненные по серии значения коэффициента пропускания для всех 10 серий, измеренные в диапазоне 300–1100 нм. Данный диапазон охватывает не только видимую область, но и ближние ультрафиолетовый и инфракрасный диапазоны. Следует отметить, что в области коротких длин

волн пропускание начинается с $\lambda = 325$ нм, а в области 700–1100 нм коэффициент пропускания монотонно возрастает от 40 % до приблизительно 60 %.

Как видно из рисунка 4, спектры всех образцов совпадают. Статистическая проверка гипотезы по методу сравнения двух средних подтверждает этот вывод. Для $n = m = 8$ при $\alpha = 0,05$, $T_{crit} = 1,77$, при этом расчетные значения фактора T на всем диапазоне длин волн не превышают 0,9, то есть с вероятностью 95 % серии исходных образцов являются одинаковыми. Это свидетельствует о хорошей однородности радиохромной пленки вдоль всей площади листа, что позволяет с уверенностью использовать фрагменты пленки, взятые из различных частей листа, для изготовления миниатюрных дозиметрических систем.

3.3 Облучение образцов

Облучение образцов в рентгеновском диапазоне проводилось с использованием рентгеновской терапевтической системы Xstrahl 150 на базе Ульяновского областного онкологического диспансера. Облучение проводилось со следующими параметрами: диапазон анодного напряжения – 10–150 кВ, ток рентгеновской трубки до 30 мА, максимальная мощность генератора – 3 кВт, толщина слоя половинного ослабления: минимум – 0,2 мм Al и максимум – 1,0 мм Cu (эквивалентно 13 мм Al), размер фокусного пятна – 7,5 мм, материал анода – вольфрам. Методика моделируемого эксперимента заключалась в следующем: последовательно облучаются наборы образцов пленок, при этом величина выдаваемой дозы регулируется путем увеличения времени облучения.

Облучение образцов в гамма-диапазоне проводилось с использованием медицинского радиотерапевтического аппарата Theratron Equinox 100. Радиационный источник на базе Co-60 в момент начала облучения выдвигался из хранилища, расположенного внутри корпуса, по завершении – возвращался обратно. Выданная при облучении доза определялась временем облучения. В качестве поверочного дозиметра использовался дозиметр DOSE1 с «фермеровской» камерой FC65-G. На датчик поверочного дозиметра, закрепленного в адаптере (две пластины с предусмотренным посадочным местом для датчика), последовательно накладывались ослабляющие пластины, измерялась мощность дозы радиационного излучения. Затем в той же последовательности облучались наборы образцов пленок, которые помещались поверх дозиметрического датчика. Размер поля для всех измерений составил 5x5 см.

Для дальнейших исследований были приготовлены 10 серий образцов по 8 шт. в серии. Каждая серия облучалась при определенной дозе в диапазоне 0,0985–0,975 Гр.

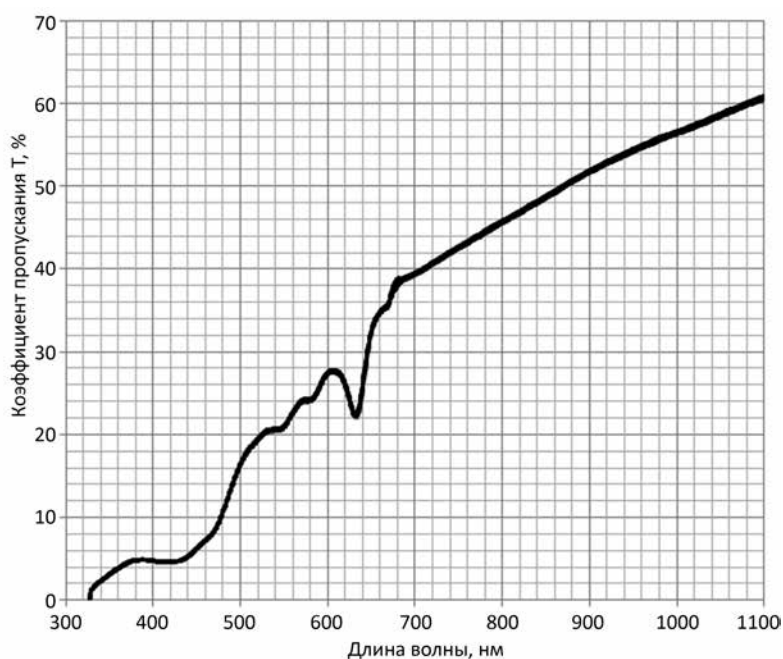


Рис. 4. Усредненные по серии значения коэффициента пропускания для 10 серий необлученных образцов пленки Gafchromic EBТ3, измеренные в диапазоне 300–1100 нм.

3.4 Измерение спектров пропускания образцов

Спектры пропускания образцов измерялись на спектрофотометре СФ102.

На рисунке 5 представлены усредненные по каждой серии значения коэффициента пропускания при различных дозах рентгеновского излучения. Видно, что участок 480–660 нм наиболее чувствителен к ионизирующему излучению, при этом, как хорошо известно из литературы, основной пик поглощения приходится на $\lambda = 635$ нм.

Для наглядности на рисунке 6 представлена зависимость различных точек спектра, взятых с шагом 50 нм, от дозы ионизирующего излучения. Кроме этого, отдельно приведен пик поглощения на длине волны 635 нм. Из рисунка видно, что в диапазонах длин волн 350–450 нм и 700–1000 нм зависимость от дозы отсутствует.

Отношение интенсивности пропускания на длине волны 635 нм к интенсивности сигнала на одной из длин волн из указанных выше диапазонов может быть использовано для исключения погрешностей, возникающих из-за возможных изменений в яркости светодиодов и чувствительности фотодетекторов в условиях нестабильной температуры и напряжения в схеме дозиметра. На практике для этих целей предпочтительнее использовать инфракрасный диапазон, поскольку в литературе имеются сведения о чувствительности пленки Gafchromic EBТ3 к ультрафиолетовому излучению [11], что может исказить данные о поглощенной дозе ионизирующего излучения.

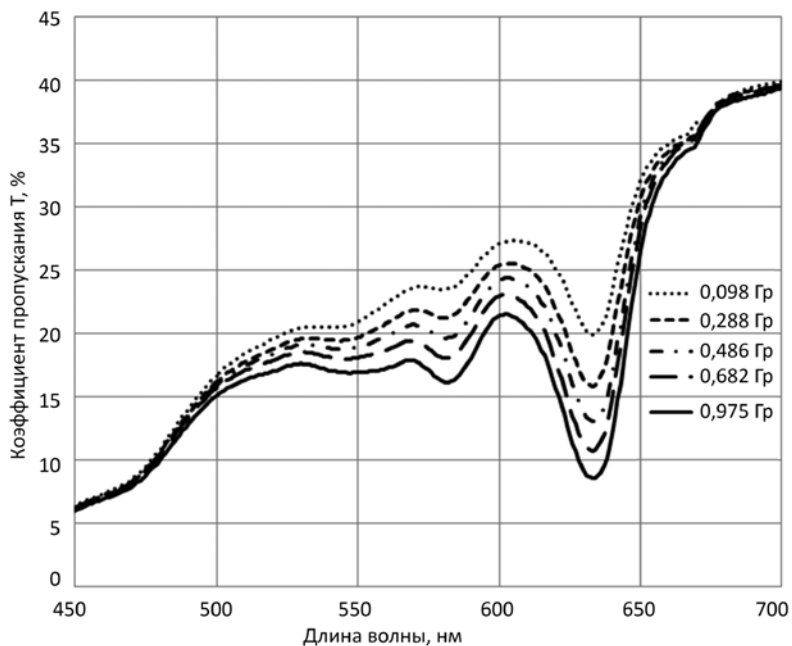


Рис. 5. Усредненные спектры пропускания образцов пленки Gafchromic EBT3, облученные при различных дозах рентгеновского излучения

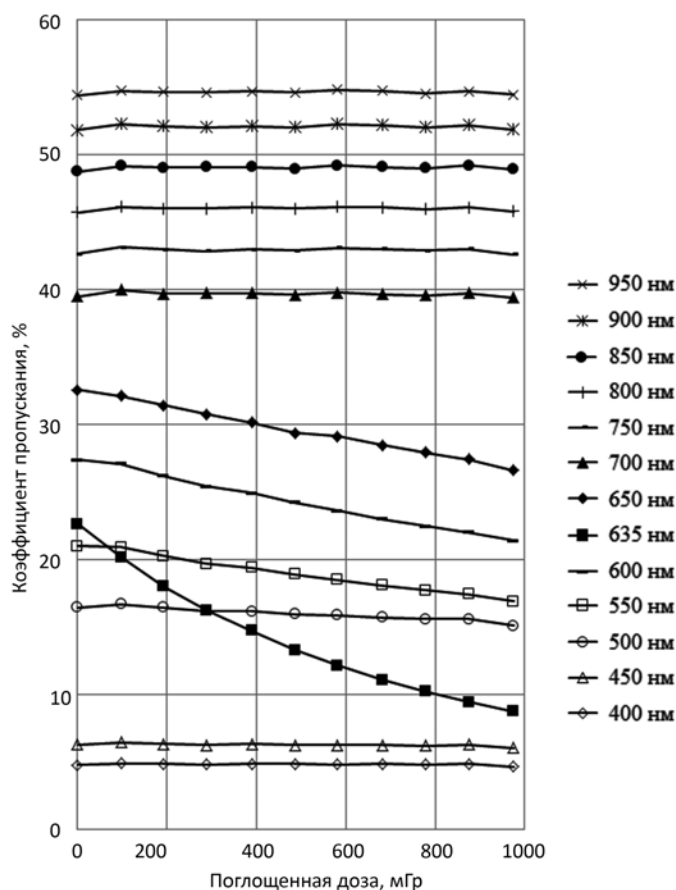


Рис. 6. Зависимости различных участков спектра пропускания образцов пленки Gafchromic EBT3 от полученной дозы рентгеновского излучения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты модельных расчетов и экспериментальных исследований показывают, что предложенная концепция системы мониторинга поглощенных доз ионизирующего излучения, содержащей персональное устройство-дозиметр на основе пленочного сенсора, приборы, считывающие показания дозиметра посредством бесконтактной технологии радиочастотной идентификации, может быть реализована на практике и обладает рядом достоинств:

1) максимальное упрощение считывания информации о накопленной дозе с использованием как стандартных настольных и стационарных RFID-считывателей, так и совместимых мобильных устройств;

2) отсутствие необходимости в источнике питания, что дает возможность производить измерения поглощенной дозы непрерывно в течение длительного срока, ограниченного лишь сроком годности радиохромной пленки, устанавливаемым производителем (для Gafchromic EBT3 – 3 года);

3) компенсация влияния температуры и нестабильности напряжения на показания за счет использования канала сравнения (второго фотодетектора) и, по крайней мере, двух различных длин волн излучения светодиода;

4) возможность реализации дозиметра в компактном форм-факторе бейджа: согласно модельным расчетам предложенная конструкция детектора с зеркальным элементом может эффективно работать при толщине не более 4 мм;

5) возможность интеграции системы мониторинга поглощенной дозы в информационные системы предприятия, в частности в систему контроля и управления доступом с использованием персонального дозиметра в качестве идентификатора пользователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дозиметрический контроль внешне-го профессионального облучения. Общие требования. Методические указания МУ 2.6.1.25-2000. – М., 2000. – 50 с.
2. Шварц К.К., Грубе М.М. Некоторые вопросы техники измерения в термолуминесцентной дозиметрии // Радиационная физика : сб. науч. тр. – Рига : Зинатне, 1967. – Вып. 5. – С. 237–257.
3. Boetter-Jensen L., McKeever S.W.S., Wintle A.G. Optically Stimulated Luminescence Dosimetry. Elsevier B.V., 2003. – 374 p.

4. Characterisation of Al₂O₃ for Use in Thermally and Optically Stimulated Luminescence Dosimetry / S.W.S. McKeever, M.S. Akselrod, L.E. Colyott, N. Agersnap Larsen, J.C. Polf, V. Whitley // *Radiation Protection Dosimetry*. 1999. – Vol. 84. – pp. 163–166.

5. EBT3 Specification and User Guide. – URL: <http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiotherapy-films/EBT/index.asp>.

6. Energy dependence of the new Gafchromic EBT3 film: Dose response curves for 50 kv, 6 and 15 mv x-ray beams / G. Massillon-JL, S.-T. Chiu-Tsao, I. Domingo-Munoz, M.F. Chan // *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology*. – 2012. – Vol. 1. – № 2. – pp. 60–65.

7. Dosimetric characterization and use of Gafchromic EBT3 film for IMRT dose verification / V.C. Borca, M. Pasquino, G. Russo et al. // *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. – 2013. – Vol. 14, № 2. – pp. 158–171.

8. Efficient protocol for radiochromic film dosimetry / D. Lewis, A. Micke, X. Yu, M.F. Chan // *Medical Physics*. 2012. – Vol. 39, № 10. – pp. 6339–6350.

9. Компьютерное моделирование взаимодействия рентгеновского излучения с радиохромными пленками Gafchromic EBT3 / А.С. Алексеев, А.В. Беринцев, С.Г. Новиков, В.В. Приходько // *Медицинская физика*. – 2017. – № 3 (75). – С. 5–9.

10. Численный расчет взаимодействия рентгеновского и гамма-излучений с радиохромными пленками Gafchromic EBT3 / А.С. Алексеев, С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, В.В. Приходько // *Сб. тез. междунар. науч.-практ. конф. «Ядерная медицина и лучевая терапия: современное состояние и ближайшие перспективы»*. – М. : Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна, 2017. – С. 6–7.

11. Abdulkadir Aydarous, Enaam Ali Al-Omary and Mahmoud El Ghazaly. Characterization of Gafchromic EBT3 films for ultraviolet radiation dosimetry // *Radiation Effects & Defects in Solids*. – 2014. Vol. 169, No. 3. – pp. 249–255.

REFERENCES

1. *MU 2.6.1.25-2000. Dozimetriceskii kontrol vneshnego professionalnogo oblucheniia. Obshchie trebovaniia. Metodicheskie ukazaniia* [Methodological Instructive Regulations. Radiation Monitoring of External Professional Irradiation. General Requirements]. Moscow, 2000. 50 p.

2. Shvarts K.K., Grube M.M. Nekotorye voprosy tekhniki izmereniia v termoluminescentnoi dozimetrii [Some Issues of Measuring Techniques in Thermoluminescent

Dosimetry]. *Radiatsionnaia fizika. Sb. nauch. Tr.* [Proc. on Radiation Physics]. Riga, Zinatne Publ., 1967, Iss. 5, pp. 237–257.

3. Boetter-Jensen L., McKeever S.W.S., Wintle A.G. *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*. Elsevier B.V. Publ., 2003. 374 p.

4. McKeever S.W.S., M.S. Akselrod, L.E. Colyott, N. Agersnap Larsen, J.C. Polf, V. Whitley Characterization of Al₂O₃ for Use in Thermally and Optically Stimulated Luminescence Dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 1999, vol. 84, pp.163–166.

5. *EBT3 Specification and User Guide*. Available at: <http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiotherapy-films/EBT/index.asp>.

6. Massillon-JL G., S.-T. Chiu-Tsao, I. Domingo-Munoz, M.F. Chan. Energy Dependence of the New Gafchromic EBT3 Film: Dose Response Curves for 50 kv, 6 and 15 mv X-Ray Beams. *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology*, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 60–65.

7. Borca V.C., M. Pasquino, G. Russo et al. Dosimetric Characterization and Use of Gafchromic EBT3 film for IMRT Dose Verification. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2013, vol. 14, no. 2, pp. 158–171.

8. Lewis D., A. Micke, X. Yu, M.F. Chan Efficient Protocol for Radiochromic Film Dosimetry. *Medical Physics*, 2012, vol. 39, no. 10, pp. 6339–6350.

9. Alekseev A.S., Berintsev A.V., Novikov S.G., Prikhodko V.V. Kompiuternoe modelirovanie vzaimodeistviia rentgenovskogo izlucheniia s radiokhromnymi plenkami Gafchromic EBT3 [Computer Simulation of Gafchromic Ebt3 Film Interaction with X-Ray Radiation]. *Meditsinskaia fizika* [Medical Physics], 2017, no. 3 (75), pp. 5–9.

10. Alekseev A.S., Novikov S.G., Berintsev A.V., Prikhodko V.V. Chislennyi raschet vzaimodeistviia rentgenovskogo i gamma-izlucheniia s radiokhromnymi plenkami Gafchromic EBT3 [Numerical Computation of Gafchromic Ebt3 Film Interaction with X-Ray and Gamma-Ray Radiation]. *Sb. tez. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Iadernaia meditsina i luchevoia terapiia: sovremennoe sostoianie i blizhaishie perspektivy"* [Proc. of Intern. Sci. Workshop on Nuclear Medicine and X-Ray Therapy: Modern Situation and Near-Term Outlook]. Moscow, Federalnyi meditsinskii biofizicheskii tsentr im. A.I. Burnaziana Publ., 2017, pp. 6–7.

11. Abdulkadir Aydarous, Enaam Ali Al-Omary and Mahmoud El Ghazaly. Characterization of Gafchromic EBT3 Films for Ultraviolet Radiation Dosimetry. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 2014, vol. 169, no. 3, pp. 249–255.