

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ БГУ (БЕЛАРУСЬ)
ИНСТИТУТ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НАН (УКРАИНА)
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (РОССИЯ)**

**Четвертая международная конференция
ИНЖЕНЕРИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

ИСМАРТ 2014

Тезисы

12 – 16 октября 2014 года

Минск, Беларусь

Минск
Издательский центр БГУ
2014

УДК 539.1+621.039

Редактор

М. В. Коржик

Четвертая международная конференция «Инженерия
сцинтилляционных материалов и радиационные технологии»–
ИСМАРТ 2014, 12 – 16 октября 2014 г., Минск, Беларусь: Тезисы.

ISBN

Конференция посвящена проблемам регистрации ионизирующего излучения в различных областях – от физики высоких энергий до медицинской диагностики и систем радиационной безопасности. Мультидисциплинарность конференции позволяет объединить современные достижения фундаментальных и прикладных исследований, а также новейшие технологии и инженерные решения для разработки детекторов радиации.

Проведение международной конференции ИСМАРТ 2014 в Белорусском государственном университете является важным фактором развития научных связей в сфере ядерного приборостроения. Наша страна в скором времени станет производителем атомной энергии, поэтому налаживание образовательных, научных и производственных связей в области разработки и совершенствования оборудования для измерения ионизирующих излучений является актуальным и отвечает запросам развития высоких технологий в республике.

БГУ активно участвует в реализации исследовательских программ, имеющих общецивилизационное значение. Институт ядерных проблем и Национальный центр физики частиц и высоких энергий нашего университета стояли у истоков создания калориметрических детекторов экспериментальной установки CMS на ускорителе LHC в ЦЕРНе. Данные, полученные с помощью этих детекторов, внесли решающий вклад в открытие бозона, предсказанного Хиггсом.

Мы с оптимизмом смотрим в будущее развития науки в данном направлении в нашей стране. Надеюсь, что обсуждаемые на конференции научные вопросы будут способствовать прогрессу в создании функциональных материалов для экспериментов на коллайдерах нового поколения, таких как NICA в ОИЯИ (Дубна) и FCC в ЦЕРНе, а также их использованию в медицинской диагностике, экологическом монито-ринге и промышленности.

*Ректор Белорусского государственного университета
академик С. В. Абламейко*

Председатель: академик Абламейко С.В. (Беларусь)

Сопредседатели: Барышевский В.Г. (Беларусь)
Коржик М.В. (Беларусь)
Максименко С.А. (Беларусь)
Шумейко Н.М. (Беларусь)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Лобко А.С. (Беларусь), председатель
Гринев Б.В. (Украина)
Гектин А.В. (Украина)
Данилов М.В. (Россия)
Дейч Р. (США)
Кожемякин В.А. (Беларусь)
Коржик М.В. (Беларусь)
Лекок П. (Франция)
Лущик А. (Эстония)
Матвеев В.А. (Россия)
Розенфельд А. (Австралия)
Семиноженко В.П. (Украина)
Скринский А.Н. (Россия)

ПРОГРАММА

12.10.2014

14.00-20.00 Регистрация, НИИ ЯП, к. 200

13.10.2014

Детекторы в физике высоких энергий и материалы для регистрации излучений

Пленарная сессия (ректорат)

10.00-10.15 Открытие. **Абламейко С. В.**, Ректор БГУ

10.15-11.00 **Шумейко Н.М.**, НЦ ФЧВЭ БГУ, Эксперименты на ЛНС. Состояние и перспективы

11.00-11.30 Кофе и регистрация

11.30-12.00 **Ольшевский А. Г.**, ОИЯИ, Нейтринная программа ОИЯИ

12.00-12.30 **Рогачевский О.В.**, ОИЯИ, Статус проекта NICA в ЛФВЭ ОИЯИ

12.30-13.00 **Гектин А.В.**, ИСМА, Сцинтилляционные материалы – настоящее и будущее

13.00-14.30 Обед и регистрация

14.30-14.50 **Лобко А.С.**, НИИ ЯП БГУ, Future circular collider (FCC) and its challenges to new detector technologies

14.50-15.10 **Калинников В.А.**, ОИЯИ, ECAL калориметр для эксперимента COMET

15.10-15.30 **Коржик М.В.**, НИИ ЯП БГУ, Радиационное повреждение сцинтилляционных детекторов в коллай-дерных экспериментах на ЛНС

15.30-15.50 **Тихомиров В.В.**, НИИ ЯП БГУ, О влиянии кристаллической структуры на эффективность и точность электромагнитных калориметров

15.50-16.10 **Немченко И.Б.**, ОИЯИ, Разработка и исследование новых пластмассовых и жидких сцинтилляторов в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований

16.10-16.40 Кофе и регистрация

16.40-17.00 **Жмурин П.Н.**, ИСМА, Новые подходы к улучшению свойств пластмассового сцинтиллятора

17.00-17.20 **Кресло И.Е.**, Бернский университет, ARGONTUBE – время-проекционная камера на жидком аргоне с рекордной длиной дрейфа

17.20-17.40 **Давыдов Ю.И.**, ОИЯИ, The LYSO:Ce crystals of SICCAS, Saint-Gobain and Zecotek comparison

17.40-18.00 **Орлов И.А.**, ОИЯИ, Исследование характеристик сборки модулей электромагнитного калориметра ECAL0 для эксперимента COMPASS на электронном пучке ускорителя ELSA

16.00-18.00 Постерная сессия – Физика высоких энергий и материалы для регистрации излучений (ректорат)

Толстухин И.А., НИЯУ МИФИ, Магнитный спектрометр эксперимента GlueX

Величева Е.П., ОИЯИ, Моделирование и экспериментальное исследование оптических свойств длинных кристаллов LYSO и GSO для COMET калориметра

Батурицкий М.А., НЦ ФЧВЭ БГУ, Комплект восьмиканальных ИМС транзистивных усилителей Ampl-8.12 – Ampl-8.15 и компаратора Disc-8.15 для годоскопических систем

Зязюля Ф. Е., НЦ ФЧВЭ БГУ, Транзисторный высоковольтный делитель для ФЭУ

Михайлов В.А., НЦ ФЧВЭ БГУ, Заказная ИМС девятиканального усилителя-формирователя для калориметрии с использованием ЛФД типа MAPD

Чичин А.С., НЦ ФЧВЭ БГУ, 32-канальный модуль усиления-дискриминирования для эксперимента «Термализация»

Бердников В.В., НИЯУ МИФИ, Трековый многопроволочный дрейфовый детектор с катодным съемом информации в эксперименте GlueX

Бердников В.В., НИЯУ МИФИ, Измерение удельной первичной ионизации в дрейфовых камерах эксперимента GlueX

Рыбников А.В. ОИЯИ, Установка для исследования характеристик протяженных сцинтилляционных кристаллов

Лазарев И.В., ИСМА, Композиционные люминесцентные материалы как радиационно-стойкие световоды

Камнев И.И., ОИЯИ, Очистка линейного алкилбензола для эксперимента JUNO

Васильев Д.А., ИРЭ им. Котельникова, **Васильева Н.В.**, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Оптические свойства эпитаксиальных плёнок $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}:Ce^{3+}$ как возможный новый сцинтилляционный материал

Галкин С.Н., ИСМА, Проблемы и перспективы получения кристаллов ZnSe для болометрических сцинтилляционных детекторов

Гриппа А.Ю., ИСМА, Получение и сцинтилляционные свойства монокристаллов на основе бромидов рубидия и кальция, активированных европием

Коваленко Н.О., ИСМА, Bulk single crystals ZnS:(Ag,Al) for alpha-particle spectroscopy

Курцев Д.А., ИСМА, Получение сцинтилляционных кристаллов $\text{Lu}_{2x}\text{Gd}_{2-2x}\text{SiO}_5\text{:Ce}$ (LGSO:Ce) с улучшенными характеристиками методом Чохральского

14.10.2014

Ядерное приборостроение и материалы для регистрации излучений

Пленарная сессия

Ядерное приборостроение

9.00-9.30 **Кожемякин В.А.**, АТОМТЕХ, Разработка предложений по комплектованию АСКРО Белорусской АЭС оборудованием с измерительными каналами на основе сцинтилляционных детекторов

9.30-10.00 **Казимиров А.С.**, «Атомкомплексприбор», Опыт использования сцинтилляционных детекторов в спектрометрических системах радиационной безопасности для АЭС, экологического контроля и мониторинга

10.00-10.30 *Кофе и регистрация*

10.30-11.00 **Мадьяров А.В.**, ПОЛИМАСТЕР, Технологии предотвращения непреднамеренного перемещения и незаконного оборота радиоактивных материалов

11.00-11.30 **Жуковский А.И.**, АТОМТЕХ, Гамма-спектрометр МКС-АТ6104DM для радиационного контроля водной среды и придонных отложений

11.30-11.50 **Антонов А.В.**, АТОМТЕХ, Спектрометрическая система радиационного мониторинга

11.50-12.10 **Федоров А.А.**, НИИ ЯП БГУ, Детектор тепловых нейтронов на основе сцинтилляционного литиевого стекла и кремниевого фотоэлектронного умножителя

12.10-12.30 **Шустов А.Е.**, НИЯУ МИФИ, Сцинтилляционный детектор для нейтрон-захватной терапии

12.30-12.50 **Гроздов Д.С.**, ГЕОХИ РАН, Расчет пространственной эффективности регистрации пиков полного поглощения сцинтилляционным детектором с использованием коллиматоров с разной апертурой

13.00-14.30 *Обед*

Материалы для регистрации излучений

- 14.30-15.00 **Сидлецкий О.Ц.**, ИСМА, Тенденции разработок смешанных кристаллов неорганических сцинтилляторов
- 15.00-15.30 **Ширан Н.В.**, ИСМА, Сцинтилляционная эффективность и гигроскопичность щелочных и щелочно-земельных иодидов
- 15.30-15.50 **Мечинский В.А.**, НИИ ЯП БГУ, Электромагнитная калориметрия на основе сцинтилляторов вольфрамата свинца при различных температурах
- 15.50-16.10 **Пуныко С.А.**, ИМК НАНУ, Исследование рентгенолюминесценции пленок SiC
- 16.10-16.30 **Чеховский В.А.**, НЦ ФЧВЭ БГУ, Оптико-электронное устройство: электронный модуль для обработки сигналов лавинных фотодиодов

16.30-17.00 Кофе

- 17.00-17.20 **Казючиц Н.М.**, БГУ, Детекторные структуры на основе синтетических алмазов СТМ «Алмазот»
- 17.20-17.40 **Дудчик Ю.И.** НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Многоэлементные преломляющие линзы для рентгеновского и гамма-диапазонов спектра
- 17.40-18.00 **Рогожин А.А.**, ВИМС, Сцинтилляционные детекторы для геофизических исследований
- 18.00-18.20 **Олих Я.М.**, Институт физики полупроводников имени В.Е. Лашкарёва, Акустические эффекты перекомпенсации в монокристаллах CdTe:Cl
- 16.00-18.00 Постерная сессия – Ядерное приборостроение, материалы для регистрации излучений, детекторы и детекторные системы для медицинской диагностики и систем безопасности, радиационное повреждение материалов и детекторов***

Жуковский А.И., АТОМТЕХ, Численное моделирование радиоактивного загрязнения почвы и измерений

Федоров А.А., НИИ ЯП БГУ, Снижение чувствительности нейтронных детекторов на основе литиевых сцинтилляционных стекол к гамма-излучению

Барченко А.Г., АТОМТЕХ, Мобильный высокочувствительный спектро-метрический комплекс радиационного сканирования МКС-АТ6103 для обнаружения локальных загрязнений

Хорошко Л.С., БГУИР, Формирование и люминесценция алюмоиттриевых композитов, легированных тербием, в пористом анодном оксиде алюминия

Плющ А.О., НИИ ЯП БГУ, Композиционный материал на основе графитовых нанопластин для экранировки электромагнитного излучения

Космына М. Б., ИСМА, Детекторы гамма-излучения на основе твердого раствора CdZnTe

Новосад И.С., Львовский национальный университет им. И. Франко, Влияние примеси бария на люминесцентные свойства сцинтиллятора CaI_2

Горбачева Т.Е., ИСМА, Применение кремнийорганических материалов в технологическом процессе производства сцинтилляционных детекторов

Верещагина Н.Ю., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Кластеризация марганца в термолюминесцентном материале $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ как возможная причина нелинейности зависимости отклика от дозы

Покидов А.П., ИФФТ РАН, Улучшение радиационной прочности и поглощательной способности органических сцинтилляторов наночастицами с тяжелыми атомами

Переймак В.Н., ИСМА, Пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола для n/γ -разделения

Лукашевич Р.В., АТОМТЕХ, Блоки-компараторы для метрологической аттестации слабых полей рентгеновского и гамма-излучения по мощности дозы

Дёмин А.В., ИСМА, Использование математических методов распознавания образов для калибровки линейности детектора гамма-камеры

Малков А.П., ОАО "ГНЦ НИИАР", Методика измерения распределения урана в мишенях для наработки ^{99}Mo неразрушающим методом гамма-плотнометрии

Веренич К.А., НИИ ЯП БГУ, Приборные коэффициенты для определения активности йода в щитовидной железе человека с помощью неспециализированных дозиметров

Кутень С. А., НИИ ЯП БГУ, Simulation of induced radiation in components of a proton beam line segment produced by proton beam losses

Волков В.Г., ИСМА, Измерение параметров рентгеновского поля при медицинских диагностических и терапевтических процедурах

Кухарев А.В., БГУИР, Индуцированные импульсом лазера колебания намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/диамагнетик/ферромагнетик

Васин А.А., АстГосУниверситет, ИФТТ РАН, Прямое преобразование радиации в электричество в ориентационно упорядоченных нанокompозитах на основе биоматериалов

Данилкин М.И., ФИАН, Модель кинетики термолюминесценции для термолюминесцентных дозиметрических материалов

Дубцов И.Н., ИСМА, Детекторы тепловых нейтронов на основе $\text{ZnS(Ag)}/^6\text{LiF}$ и $\text{ZnS(Ag)}/\text{H}_3^{10}\text{BO}_3$

Шпилинская О.Л., ИСМА, Детекторы тепловых нейтронов на основе $\text{ZnS(Ag)}/^6\text{LiF}$ и $\text{ZnS(Ag)}/\text{H}_3^{10}\text{BO}_3$

15.10.2014

Детекторы и детекторные системы для медицинской диагностики и систем безопасности, радиационное повреждение материалов и детекторов

Пленарная сессия

Детекторы и детекторные системы для медицинской диагностики и систем безопасности

9.00-9.20 **Дёмин А.В.**, ИСМА, Применение ГРИД для реконструкции координат сцинтилляции в диагностической радионуклидной аппаратуре

9.20-9.40 **Иванов А.И.**, ИСМА, Комбинированные методы обнаружения специальных ядерных материалов

9.40-10.00 **Малков А.П.**, ОАО "ГНЦ НИИАР", Высокотехнологичные источники ионизирующего излучения производства ОАО "ГНЦ НИИАР" и особенности их применения для целей контроля ядерных материалов неразрушающими методами

10.00-10.30 Кофе

10.30-10.50 **Веренич К.А.**, НИИ ЯП БГУ, Фотонейтроны вокруг медицинского линейного ускорителя электронов

10.50-11.10 **Кутень С.А.**, НИИ ЯП БГУ, Начальная плотность ионизации, создаваемая тяжелыми заряженными частицами в рабочем объеме ионизационной камеры

11.10-11.30 **Ягнюкова А.К.**, НИЯУ МИФИ, Гамма-локатор для радионуклидной диагностики онкологических заболеваний

Радиационное повреждение материалов и детекторов

11.30-11.50 **Близнюк О.Н.**, Национальный технический университет "ХПИ", Нестационарная кинетика радиационных повреждений атомарных криокристаллов, стимулированных автолокализацией электронных возбуждений

11.50-12.10 **Калинов В.С.**, Институт физики НАНБ, Образование радиационных дефектов и их оптические характеристики в кристаллах и нанокристаллах фторида лития

- 12.10-12.30 **Лазарев И.В.**, ИСМА, Влияние условий получения поликристаллов стилибена на их оптические и сцинтилляционные свойства
- 12.30-12.50 **Сытов А.И., Сафронов И.В.**, НИИ ЯП БГУ, Ионизационные потери заряженных частиц высоких энергий в кристалле и их влияние на эффективность коллимации на основе изогнутых кристаллов
- 13.00-14.30** **Обед**
- 14.30-18.00 **Экскурсия: Новый Музей Победы**
- 18.00-21.00 **Банкет**

16.10.2014

Фотоприемники, Электроника и системы сбора данных, Новые методы детектирования и высокотехнологичные источники

Пленарная сессия

Фотоприемники

- 9.00-9.30 **Садыгов З. Я.**, ОИЯИ, Физическая модель формирования одноэлектронного фотоотклика в микропиксельных лавинных фотодиодах
- 9.30-10.00 **Белянченко С.А.**, ООО "МЭЛЗ ФЭУ", Российские сцинтилляционные ФЭУ – разработка и производство МЭЛЗ ООО "МЭЛЗ ФЭУ"

10.00-10.30

- 10.30-10.50 **Абдуллаев Х.И.**, Национальная Академия Авиации Азербайджана, Метод определения напряжения пробоя микропиксельных лавинных фотодиодов

Электроника, системы сбора данных и высокотехнологичные источники

- 10.50-11.10 **Лобко А.С.**, НИИ ЯП БГУ, Generation and detection of ultra-fast x-ray pulses
- 11.10-11.30 **Батурицкий М.А.**, НЦ ФЧВЭ БГУ, 9-канальная гибридная терморегулируемая оптическая головка для калориметрии
- 11.30-11.50 **Педаш В.Ю.**, ИСМА, Схемотехнические решения для повышения временного разрешения в сцинтилляционных детекторах на основе ФЭУ
- 11.50-12.10 **Батурицкий М.А.**, НЦ ФЧВЭ БГУ, Transimpedance amplifiers for silicon photomultiplier MAPD-1
- 12.10-12.30 **Ополонин А.Д. (Волков В.Г.)**, ИСМА, Математическая модель сигналов сцинтилляционного детектора ионизирующих излучений (ИИ)

Новые материалы и новые подходы

12.30-12.50 **Огурцов А.Н.**, Национальный технический университет "ХПИ", Мультипликация электронных возбуждений в процессе неупругого рассеяния фотоэлектронов в атомарных криокристаллах

13.00- 14.30 Обед

Новые материалы и новые подходы (продолжение)

14.30-14.50 **Класен Н.В.**, ИФТТ РАН, Преимущества сцинтилляционных нанокompозитов органика–неорганика с регулярной сверхструктурой типа фотонных кристаллов

14.50-15.10 **Третьяк Е.В.**, НИИ ФХП БГУ, Возможности коллоидно-химического подхода к синтезу оптических материалов

15.10-15.30 **Герасимов Я.В.**, ИСМА, Смешанные тантало-ниобаты для применений в экспериментах физики высоких энергий

15.30-15.50 **Галенин Е.П.**, ИСМА, Инженерия гигроскопичных сцинтилляторов с высоким световым выходом

15.50-16.10 **Баранов В.Ю.**, ОИЯИ, Инженерия сцинтилляционных кристаллов на основе $\text{Bi}_4(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})\text{O}_{12}$

16.10-16.30 **Чернодольский Я.Н.**, Львовский национальный университет им. И.Франко, Зонная энергетическая структура и параметры термализации электронов наночастиц LaPO_4 и LuPO_4

16.30-16.50 **Даниленко В.Н., Ковальский Е.А.**, ООО «ЛСРМ», Новые разработки в области спектрометрического программного обеспечения для переносных и стационарных систем

16.50-17.00 **Коржик М.В.** Заключительное слово. Закрытие конференции

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ МИКРОПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ

Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М.

Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан,
khagani61@gmail.com; ramilito_09@rambler.ru

В данной работе приведен новый графический метод определения напряжения пробоя лавинных фотодиодов на основе известной формулы Миллера

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_d}{U_{br}} \right)^k}, \quad (1)$$

где M – коэффициент усиления, U_{br} – напряжение пробоя р-п-перехода лавинного фотодиода, k – эмпирический параметр. Предложенный метод отличается от аналогов высокой точностью определения U_{br} и k благодаря исключению влияния на вольт-амперную характеристику лавинного фотодиода темнового генерационного тока и тока поверхностной утечки.

Известно, что постоянный полный ток J_t лавинного фотодиода можно выразить в виде $J_t = J_s + M(I_d + I_{ph})$, где J_s – поверхностный ток утечки, не участвующий в лавинном процессе, M – коэффициент усиления, I_d – инициирующий лавину объемный темновой генерационный ток, I_{ph} – инициирующий лавину постоянный фототок. В случаях выполнения условий $I_{ph} \gg I_d$ и $M \gg 1$ минимизируются влияния темнового генерационного тока и тока поверхностной утечки на характер лавинного процесса в лавинном фотодиоде. В этом случае из выражения (1) можно получить следующую рабочую формулу для определения U_{br} и k

$$\frac{1}{J_t} = \frac{k}{I_{ph}} - \frac{k}{U_{br} I_{ph}} \cdot U. \quad (2)$$

Предложенный выше метод использовался для определения параметров U_{br} и k двух образцов лавинных фотодиодах. Первый лавинный фотодиод – S10362-33-025C площадью 3мм×3мм был изготовлен фирмой Hamamatsu (Япония), а второй – MAPD-3N площадью 3мм×3мм – фирмой Zecotek Imaging System (Сингапур). В качестве источника света использовался полупроводниковый светодиод с длиной волны излучения 450 нм.

На Рис. 1 представлены зависимости обратной величины полного тока лавинных фотоприемников в зависимости от приложенного к ним напряжения. По пересечению линейной части зависимости определялось напряжение пробоя, которое для S10362-33-025C составило $U_{br} = 69,6$ В, а для MAPD-3N – $U_{br} = 87,8$ В. По наклону кривых 1 и 2 определялся эмпирический параметр k для каждого фотодиода. Параметр k составлял величину в первом фотодиоде 1,2, а во втором – 1,0. Таким образом, предложен и апробирован новый метод определения напряжения пробоя микропиксельных лавинных фотодиодов.

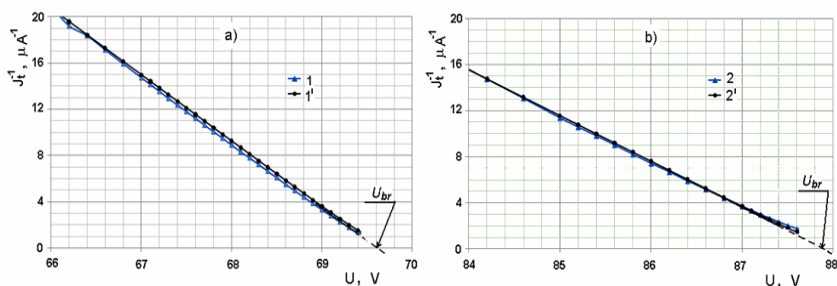


Рис. 1. Зависимости обратного тока фотодиодов от приложенного напряжения:
 1 – фотодиод S10362-33-025C, 1' – расчет по формуле Миллера;
 2 – фотодиод MAPD-3N, 2' – расчет по формуле Миллера

КОМПЛЕКТ ВОСЬМИКАНАЛЬНЫХ ИМС ТРАНСРЕЗИСТИВНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ Ampl-8.12 – Ampl-8.15 И КОМПАРАТОРА Disc-8.15 ДЛЯ ГОДОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Алексеев Г.Д.¹, Батурицкий М.А.², Дворников О.В.³,
Михайлов В.А.², Солин А.А.², Солин А.В.², Терехов Г.С.³

¹ Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия,

² Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,

³ ОАО «МНИПИ», Минск, Беларусь,

m_batouritski@hep.by

В настоящее время в ОИЯИ ведется разработка мюонной системы эксперимента PANDA/FAIR (г. Дармштадт, Германия), разработан ее полномасштабный прототип (4000 каналов, масса 10 т). Для измерения координат мюонов используются двухкоординатные мини-дрейфовые трубки (МДТ) с открытой геометрией катода, которые плотно стыкуются с железным ярмом соленоида мишенного спектрометра. Но все равно остаются щели, которые для увеличения эффективности регистрации предполагается перекрывать сцинтилляторами с фотоприемниками в виде многопиксельных лавинных фотодиодов (ЛФД) типа MAPD-1.

Параметры усилителя	Ampl-8.12	Ampl-8.13	Ampl-8.14	Ampl-8.15
Напряжение питания, В	$\pm 3,3$			
Выходная нагрузка, Ом, не менее	2000			
Рассеиваемая мощность $\pm 3 \dots 4$ В, мВт/корпус	180–480	210–450	220–490	220–470
Дифф. коэф-т преобразования, K_{IV} , мВ/мкА	29,4	15,3	26,0	15,2
Полярность входного сигнала	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
Входное сопротивление, R_{in} , Ом	≈ 65	≈ 65	≈ 65	≈ 65
Скв. шумовой ток, I_{noise} при: $C_D = 0$, нА;	217	330	198	325
Фронт/спад вых. сигнала (0,1–0,9) при $C_D = 0$, нс	5,8	3,2	4,7	3,0
Полоса частот по уровню –3 дБ при $C_D = 0$, МГц	60	109	74	117
Задержка распространения при $C_D = 0$, нс	4,6	3,5	4,4	3,5
Разбаланс дифференциального выхода, В	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$
Динамический диапазон при $C_D = 0$, дБ	52,7	54,7	53,3	53,7

В зависимости от ширины щелей регистрация сигналов будет выполняться одноканальными и восьмиканальными ИМС усилителей и дискриминаторов. В 2011 г. в НЦ ФЧВЭ БГУ разработан комплект одноканальных ИМС AD-1.14–1.17, а сейчас изготовлен комплект восьмиканальных ИМС Ampl-8.12–8.15 (см. таблицу). К ним предъявлялись требования использовать схемотехнику и топологию ИМС Ampl-8.3 и Disc-8.3, хорошо зарекомендовавших себя в ряде предыдущих экспериментов (D0 и др.). Усилители имеют различные полосы частот и коэффициенты преобразования, чтобы перекрыть интервалы, в которых хотя бы один усилитель согласуется с окончательным вариантом MAPD, параметры которых быстро модифицируются.

Измерения характеристик компаратора Disc-8.15 показали, что он имеет меньшие по сравнению с прототипом Disc-8.3 время задержки (3,7 нс) и потребляемую мощность 7,5 мА/канал. В перспективе рассмотренные ИМС могут использоваться и в эксперименте NICA-SPD.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СБОРКИ МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ECAL0 ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА COMPASS НА ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ УСКОРИТЕЛЯ ELSA

Аносов В.¹, Анфимов Н.¹, Барт Й.², Гуськов А.¹, Дзиевицки М.²,
Жембицки М.², Заремба К.², Клейн Ф.³, Крумштейн З.¹,
Курята Р.², Мажец Я.², Нагайцев А.¹, Ольшевский А.¹, Орлов И.¹,
Рыбников А.¹, Рихтер А.², Селюнин А.¹, Фролов В.¹,
Фроммбергер Ф.³, Хиллерт В.³, Чалышев В.¹,
Чириков-Зорин И.¹, Элснер Д.³

¹ Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия,

² Варшавский политехнический университет, Институт радиоэлектроники,
Варшава, Польша,

³ Физический институт Боннского университета, Бонн, Германия,
Ivan.Orlov@cern.ch

Сборка модулей нового электромагнитного калориметра ECAL0 эксперимента COMPASS была протестирована на электронном пучке ускорителя ELSA. ECAL0 будет использоваться в программе измерения обобщённых партонных распределений.

ECAL0 представляет собой калориметр типа “шашлык” с высокой гранулярностью (размер ячейки 4×4 см²). Каждый модуль калориметра (3×3 ячейки) состоит из 109 чередующихся слоёв свинца (0.8 мм) и сцинтиллятора (1.5 мм). Суммарная толщина калориметра составляет около 15 радиационных длин. Светосбор осуществляется посредством спектросмещающих волокон, передающих свет на микропиксельные лавинные фотодиоды.

Используемые фотодиоды имеют широкий динамический диапазон, который позволяет обеспечить хорошую линейность отклика. В конструкции калориметра используются фотодиоды со сверхвысокой плотностью пикселей (до 1.5×10^4 мм⁻²) и площадью в 3×3 мм². Были использованы фотодиоды типа MAPD-3A и MAPD-3N фирмы Zecotek, в будущем предполагается использоваться фотодиоды фирмы Hamamatsu типа MPPC S12572-010P. Активные части модулей калориметра изготовлены в Харькове в Институте сцинтилляционных материалов.

Тестирование сборки из 9 модулей (9×9 ячеек) было произведено на выведенном электронном пучке низкой интенсивности (2×10^3 е³/с). Измерения были выполнены при значениях энергии пучка: 0.8 ГэВ, 1.6

ГэВ и 3.2 ГэВ. Также была измерена угловая зависимость отклика и энергетического разрешения калориметра от угла в диапазоне от 0 до 36 градусов.

Результаты проведённых тестов наглядно продемонстрировали способность калориметра ECAL0 измерять энергию фотонов с необходимой точностью в исследуемом угловом диапазоне (до 0.6 рад). Полученные результаты демонстрируют хорошее согласие с предсказаниями Монте-Карло моделирования, что позволяет использовать моделирование для оптимизации алгоритмов реконструкции кластеров, в которых будут учтены как эффекты, связанные с углом падения, так и краевые эффекты.

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Антонов А.В., Антонов В.И., Барченко А.Г., Быстров Е.В.,
Кожемякин В.А., Лукашевич Р.В.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
Минск, Беларусь, rimlianin@gmail.com*

Необходимость контроля за радиационной обстановкой на объектах ядерного цикла, таких как АЭС, хранилища отработавшего ядерного топлива и т.д., а также в районах воздействия потенциальных источников радиоактивного загрязнения является неизменно актуальной темой для исследований и разработок. При этом часто возникает необходимость исследования и контроля захоронения ядерных материалов с неизвестным радионуклидным составом в жестких условиях эксплуатации. Для решения такого рода задач предприятием «АТОМТЕХ» была разработана спектрометрическая система радиационного мониторинга (ССРМ).

ССРМ предназначена для выполнения непрерывного спектрометрического радиационного мониторинга местности или объекта. ССРМ в составе со спектрометрическими блоками детектирования (БД) постоянно измеряет спектр гамма-излучения за заданное время, проводит идентификацию радионуклидов, измеряет мощность дозы гамма-излучения (МД), определяет превышение заданных пороговых уровней по МД, определяет радионуклидный состав объекта мониторинга, протоколирует все действия и сохраняет результаты. Система состоит из набора спектрометрических интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения, коммутационного шкафа и ПК. БД соединяются с ПК при помощи проводной связи, организованной по интерфейсу EIA-485. На стороне оператора ряд линий связи коммутируется с ПК при помощи многопортового конвертера последовательных интерфейсов.

БД являются блоками сцинтилляционного типа, с использованием кристалла NaI(Tl) в качестве детектора. Разработано два типа конструкции с применением детекторов размером 40×40 мм и 63×63 мм. Варианты исполнения определяются исходя из поставленных задач: получение более широкого диапазона измеряемой амбиентной мощности дозы гамма-излучения (МД) или более высокой чувствительности каждым отдельным блоком соответственно.

Корпус прибора разработан специально с учетом сложных условий эксплуатации (Степень защиты от пыли и влаги соответствует стандарту IP67). БД могут устанавливаться в скважинах, на внешних стенах зданий, на открытой местности.

Разработанная система позволяет проводить непрерывный радиационный контроль на территории объектов в районах воздействия потенциальных источников радиоактивного загрязнения, при этом блоки детектирования могут быть распределены по территории на достаточно большом удалении от места расположения оператора системы.

МОБИЛЬНЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС РАДИАЦИОННОГО СКАНИРОВАНИЯ МКС-АТ6103 ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Антонов А.В., Антонов В.И., Барченко А.Г., Быстров Е.В.,
Гуринович В.И., Кожемякин В.А., Лукашевич Р.В.
*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
Минск, Беларусь, rimlianin@gmail.com*

Обнаружение и идентификация радионуклидов, контроль за их перемещением остается актуальной темой исследований и разработок. Для решения задач пограничного контроля, исследования мест ядерных испытаний, контроля зараженных территорий, мест захоронений радиоактивных отходов и т.д. предприятием УП «АТОМТЕХ» был разработан мобильный высокочувствительный спектрометрический комплекс радиационного сканирования МКС-АТ6103.

Мобильный комплекс радиационного сканирования МКС-АТ6103 предназначен для выполнения радиационной разведки местности, поиска источников гамма- и нейтронного излучения с GPS привязкой на местности на базе автомобильного или воздушного транспортного средства.

Функциями данного комплекса являются: измерение энергетического распределения гамма-излучения, мощности дозы гамма-излучения, скорости счета нейтронного излучения, обнаружения источников гамма- и нейтронного излучения, идентификация радионуклидов, протоколирование всех результатов и обработки их в предоставленном прикладном программном обеспечении, построение изолиний по выбранному параметру, отображение всех данных на карте. Комплекс автономен и не требует подключения к бортовой сети транспортного средства. Не требует, но и не исключает управления и контроля со стороны оператора.

В состав комплекса входит набор блоков детектирования (БД) гамма- и нейтронного излучения, планшетный компьютер (ПК), а также набор адаптеров и принадлежностей.

Связь между ПК и измерителями гамма- и нейтронного излучения может осуществляться, как посредством беспроводного интерфейса Bluetooth, так и посредством проводного интерфейса USB. Время автономной работы комплекса от полностью заряженных батарей составляет не менее 10 часов.

Разработанный комплекс является гибкой системой радиационного сканирования, отличительной чертой которой, в первую очередь, является масштабируемость по количеству используемых измерителей. Данная особенность позволяет управлять чувствительностью комплекса к гамма- и нейтронному излучению в широких пределах. Как следствие, данный комплекс позволит соответствовать требованиям конечного потребителя по чувствительности и диапазону измерения мощности дозы гамма-, а также нейтронного излучения.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТЯЖЕННЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Анфимов А.В., Крумштейн А.В., Ноздрин А.А., Ольшевский А.Г.,
Рыбников А.В., Селюнин А.С., Федосеев Д.В.

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия,
post@jinr.ru*

В настоящее время протяженные (длиной до 300 мм и более) сцинтилляционные кристаллы находят широкое применение в детекторах ядерных излучений. Характеристики детекторов (энергетическое, временное разрешение) зависят от качества используемых в них сцинтилляционных кристаллов, которое обусловлено наличием паразитных примесей и дефектов в структуре кристаллов, возникающих в процессе их выращивания.

На практике качество сцинтилляционных кристаллов может быть определено при измерении таких характеристик, как зависимость световых выходов по длине кристалла, его неоднородность, энергетическое разрешение, величина вклада быстрой компоненты вспышки в световых выход на всей длине кристалла.

В харьковском Институте сцинтилляционных материалов (ИСМА) была разработана установка для изучения характеристик подобных сцинтилляционных кристаллов. Данная установка была усовершенствована нашей группой и адаптирована для работы при использовании малоинтенсивных источников радиоактивного излучения. В частности, была усилена защита от естественного радиационного фона. С этой целью были проведены дополнительные исследования фоновых сигналов до и после установки защиты. Написано программное обеспечение, которое позволяет управлять установкой, АЦП (DRS4 Evaluation Board v4) и проводить измерение в автоматическом режиме с последующим анализом полученных данных.

В результате тестовых измерений были получены подробные характеристики для 24 кристаллов чистого CsI (размерами 50×50×300 мм), произведенных в ИСМА. Доля высококачественных кристаллов с неоднородностью светосбора менее 15% (то есть не вносящей существенный вклад в энергетическое разрешение) составила 67%.

THE LYSO:Ce CRYSTALS OF SICCAS, SAINT-GOBAIN AND ZECOTEK COMPARISON

Artikov A.M.¹, Baranov V.Yu.¹, Budagov J.A.¹, Cordelli M.²,
Corradi G.², Dane E.², Davydov Yu.I.¹, Glagolev V.V.¹, Giovannella
S.², Happacher F.², Martini M.², Miscetti S.², Saputi A.²,
Sarra I.², Simonenko A.V.¹, Shalyugin A.N.¹,
Tereschenko V.V.¹, Usubov Z.U.¹

¹ *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia,*
² *Laboratori Nazionali di Frascati, INFN, Frascati, Italy,*
davydov@jinr.ru

The Mu2e experiment at Fermilab aims to search for the neutrinoless coherent conversion of a negative muon into electron in the Coulomb field of a nucleus. The Mu2e detector apparatus consists of a magnetic spectrometer for measurement of the electrons momentum, and an electromagnetic calorimeter (EMC) which provides an independent measurement of the electron energy, timing and position.

Calorimeter comprises about of 2000 individual crystals. Different crystal types are considered and tested before the final choice of crystals will be made. One of candidates to use in the Mu2e EMC was crystal Cerium-doped Lutetium Yttrium Oxyorthosilicate (LYSO:Ce). In this paper we present results of comparison of LYSO crystals from three vendors – Saint-Gobain, SICCAS and Zecotek (LFS, Lutetium Fine Silicate). Energy resolution, light output, longitudinal response uniformity, attenuation length of the three crystals were compared. The crystals have been irradiated by ²²Na, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs gamma sources covering 511–2500 keV energy range. The best parameters were demonstrated by the Saint-Gobain sample. In particular, it showed energy resolution $\sigma/E=2.5\%$ at $E = 2500$ keV.

TRANSIMPEDANCE AMPLIFIERS FOR SILICON PHOTOMULTIPLIER MAPD-1

Afanaciev K.¹, Alexeev G.D.², Batouritski M.¹, Dvornikov O.³,
Emeliantchik I.¹, Mikhailov V.¹, Piskun A.², Shevtsov V.¹,
Tchekhovski V.¹, Terekhov G.³, Tokmenin V.²

¹ *National Centre of Particle and High Energy Physics, BSU, Minsk, Belarus,*

² *Laboratory of Nuclear Problems of Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russia,*

³ *"MNIPI" Public Joint Stock Company, Minsk, Belarus,
m_batouritski@hep.by*

Silicon photomultiplier MAPD-1 has high gain, fast response and was developed for tracking detectors. A number of transimpedance broadband amplifiers was developed for use with these silicon photomultipliers. The amplifiers AD-1.14, AD-1.15, AD-1.16 and AD-1.17 (see Fig. 1) have gains from 1 to 20 mV/ μ A and bandwidth from 100 to 250 MHz.

A test setup was developed to investigate the performance of the amplifier-silicon photomultiplier system. The setup allowed detecting single photo-electron events and record corresponding spectra (Fig. 2). Amplification of the system, as well as the dependence of amplification on high voltage and ambient temperature were investigated. The results are in good agreement with expected behavior of the system.

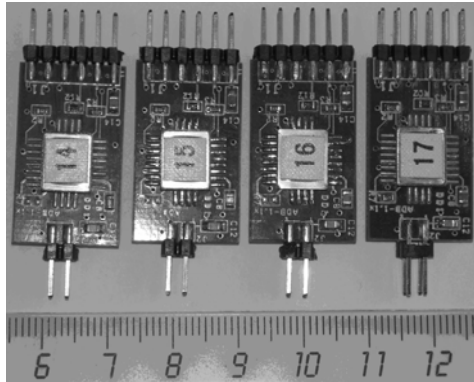


Fig. 1.

The dependence of amplification on silicon photomultiplier bias voltage shows that good stabilization of the bias voltage is required for stable operation. The dependence of amplification on ambient temperature demon-

strates that thermal stabilization of silicon photomultiplier is a critical requirement for a stable gain of the detector readout electronics. It is also demonstrated that cooling of the silicon photomultiplier improves energy resolution.

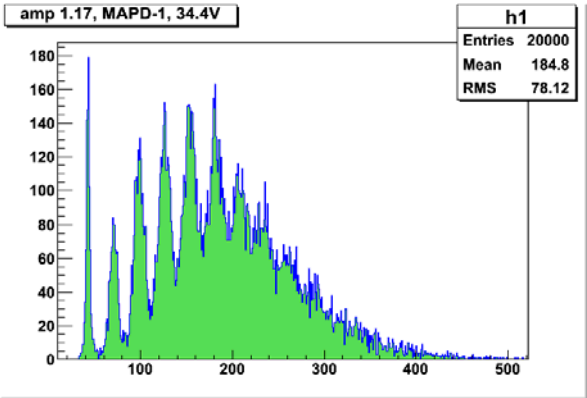
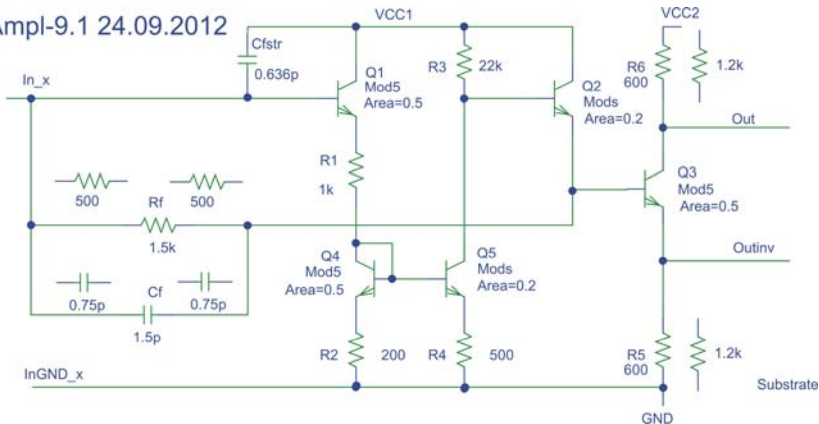


Fig. 2.

Comparison of results from different amplifiers demonstrates that matching of bandwidth of the amplifier to the bandwidth of the silicon photomultiplier is important. Amplifiers with lower bandwidth showed less than expected amplification when used with fast silicon photomultiplier.

Базылев С.Н.¹, Батурицкий М.А.², Дворников О.В.³,
Михайлов В.А.², Терехов Г.С.³, Терлецкий А.В.¹, Чичин А.С.²
¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия,
²Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,
³ОАО «МНИПИ», Минск, Беларусь,
vit_mikl@mail.ru

Ampl-9.1 24.09.2012



25

особенностями схемы являются внешние цепи формирования сигнала: интегрирующая цепь $R_{ext}\text{--}C_{ext}$ и дифференцирующая $C_{Load}\text{--}R_{Load}$, где под R_{Load} подразумевается входное сопротивление АЦП. Для обеспечения минимальных перекрестных помех коллектор выходного транзистора выведен на отдельный вывод ИС. Технические характеристики ИМС приведены в таблице.

Параметр	Значение
Напряжение питания V_{cc} , В	3,3
Токи потребления I_{cc} , мА	6
Потребляемая мощность, мВт	36
Коэффициент преобразования ток–напряжение, K_{IU} , мВ/мкА	0,077
Коэффициент преобразования «заряд–напряжение», мВ/пК	4,17
Время пика, T_p , выходного сигнала при $C_D=200$ пФ, нс	40
Длительность выходного сигнала по уровням 0,1–0,1, нс	110
Размах выходного сигнала максимальный, В	1,0
Максимальный входной заряд Q_{in} , пК	240
Шумовой ток, приведенный к входу (r.m.s.) при $C_D=300$ пФ, нА	180
Динамический диапазон при $C_D=300$ пФ, дБ, не менее	97 dB (>14 бит)

Предполагается исследование работы ИМС с другими ЛФД данного типа, в частности, с S12571-050С фирмы Хамаматсу и MicroFB 30035 SMT фирмы SIPMT.

ПРИМЕНЕНИЕ ГРИД ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ КООРДИНАТ СЦИНТИЛЛЯЦИИ В ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ РАДИОНУКЛИДНОЙ АППАРАТУРЕ

Баранник С.В., Демин А.В., Колбасин В.А.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
demin@isma.kharkov.ua*

В настоящее время для реконструкции координат сцинтилляции в детекторах коммерческих гамма-камер используется классический алгоритм Ангера. Этот алгоритм был предложен в 50-х годах прошлого века, так как допускал реализацию в аналоговых схемах. К нынешнему столетию все производители гамма-камер перешли на цифровую схему электроники сбора в детекторах, но эта тенденция не затронула алгоритм реконструкции. В последние годы активно исследуется вопрос о применении усовершенствованных, неангеровских алгоритмов. Математическое моделирование показывает, что это позволит заметно улучшить пространственное разрешение. Однако, практического развития это направление не получает. Основным камнем преткновения становится необходимость наличия в электронике сбора мощных вычислительных процессоров. Любое отклонение от простого ангеровского алгоритма требует катастрофического увеличения вычислительных ресурсов. Однопроцессорные системы с такой нагрузкой не справляются, а внедрение многопроцессорных систем в каждый детектор дорого, плохо состыковывается с электроникой сбора на уровне промышленных стандартов.

Бурное развитие телекоммуникационных технологий позволяет в наше время использовать в качестве вычислительных элементов детекторов не внутренние, а внешние устройства. На прошлой конференции авторами была представлена ГРИД-система хранения медицинских изображений. В настоящее время эта система активно развивается, в частности, к ней были подключены несколько киевских медицинских центров на скорости 1 Гигабит и выше. Такая скорость позволяет гарантированно передавать в реальном времени информацию со всех ФЭУ двухдетекторной гамма-камеры в Грид и производить параллельные вычисления по неангеровским алгоритмам реконструкции на кластере.

В результате было проведено моделирование пикового потока данных с ФЭУ детектора, передача его на грид-кластер, реконструкция координат сцинтилляций и передача рассчитанных координат обратно на детектор.

ИНЖЕНЕРИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ $\text{Bi}_4(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})\text{O}_{12}$

Баранов В.¹, Биатов М.², Бондарь В.², Будагов Ю.¹, Герасимов Я.²,
Галенин Е.², Глаголев В.¹, Давыдов Ю.¹, Сидлецкий О.²

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина

gerasimov@isma.kharkov.ua

Развитие сцинтилляционного материаловедения привело к созданию нового типа сцинтилляционных кристаллов, так называемых смешанных кристаллов, которые, зачастую, представляют собой твердые растворы замещения по катиону или аниону. Применение такого замещения в некоторых случаях приводит к положительным эффектам, например, позволяет увеличить световой выход и улучшить энергетическое разрешение путем частичного замещения в кристалле GSO гадолиния на лютеций (LGSO) [1] или в кристалле GGG галлия на алюминий (GAGG) [2]. Частичное замещение гадолиния на лантан, в плавящемся с разложением GPS, приводит к возможности получения объемных кристаллов [3, 4]. Таким образом, процедура изовалентного замещения катионов или анионов в искомом соединении является мощным инструментом для создания сцинтилляторов с улучшенными свойствами.

В данной работе представлены результаты экспериментов по получению смешанных кристаллов $\text{Bi}_4(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})\text{O}_{12}$. Потребность в таких кристаллах связана с тем, что кристаллы BGO являются достаточно дорогим и медленным сцинтиллятором (300 нс), а кристаллы BSO дешевле и быстрее (100 нс), но их сложно получать из-за инконгруэнтного плавления.

Были получены кристаллы BGSO с различным соотношением германия и кремния. Измерение сцинтилляционных характеристик полученных кристаллов позволило установить зависимость значений энергетического разрешения, светового выхода и времени затухания от соотношения германия и кремния. Световой выход смешанных кристаллов находится в интервале от 2000 до 8000 фотонов/МэВ. Энергетическое разрешение (σ/E) кристалла BGSO с соотношением $\text{Ge}^{4+}/(\text{Si}^{4+}+\text{Ge}^{4+})$ достигает 10 % при 662 кэВ, что заметно лучше разрешения чистого BSO (~15 %). Время затухания BGSO варьируется в пределах 110–220 нс в зависимости от соотношения $\text{Si}^{4+}/\text{Ge}^{4+}$. Таким образом, смешанные кристаллы с данными параметрами и стоимостью сырья на 20–50 % ниже BGO являются перспективными сцинтилляторами для использования в физике высоких энергий.

1. O.Sidletskiy, A. Belsky, A. Gektin et al. Crystal Growth & Design, 2012, 12, 441.
2. Kei Kamada et al. Crystal Growth Des. 11 (2011), 4484–4490.
3. I. Gerasymov, O. Sidletskiy et al. Journal of Crystal Growth 318 (2011), 805–808,
4. Y. Tsubota, J. H. Kaneko, M.Higuchi et al. Optical Materials 36 (2014), 665–669.

32-КАНАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ УСИЛЕНИЯ-ДИСКРИМИНИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА «ТЕРМАЛИЗАЦИЯ»

Батурицкий М.А.¹, Дворников О.В.², Зверев Е.Ю.³,
Михайлов В.А.¹, Терехов Г.С.¹, Чичин А.С.¹

¹ *Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,
Минск, Беларусь,*

² *ОАО «МНИПИ», Минск, Беларусь,*

³ *Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия,
alexanderchichin@gmail.com*

Авторы доклада представляют электронику для съёма сигналов с газонаполненных детекторов типа «соломка» и многопроволочных пропорциональных камер.

Данная электроника отличается от предшествующих аналогов высокой точностью, надёжностью, стабильностью и живучестью, что повышает достоверность полученных результатов, получаемых с детектора.

В 32-канальном модуле усиления-дискриминирования ADB-v.6.1 сигнал в каждом канале формируется при помощи заказных 8-ми канальных интегральных микросхем трансрезистивного усилителя Ampl-8.3 и дискриминатора Disc-8.3. Используемая в интегральных микросхемах биполярно-полевая технология по своему характеру является радиационно-стойкой к облучению нейтронами, что является дополнительным преимуществом данной электроники. Электроника имеет низкий порог срабатывания (0,5–5,0 мкА), невысокий уровень шумов, малую длительность фронтов, низкие значения перекрестных помех, малое время восстановления в случае высоковольтных выбросов.

Данные платы успешно использовались в мюонных системах экспериментов D0 на коллайдере «Теватрон» (Фермилаб, г. Батавия, США), COMPASS (ЦЕРН, г. Женева, Швейцария), «Термализация» с дрейфовыми трубками типа «соломка» на коллайдере УНК-70 (ИФВЭ, г. Протвино, Россия). В настоящее время разрабатывается электроника для многопроволочных пропорциональных камер эксперимента «Термализация» по исследованию странности и неупругих каналов вблизи кинематических границ.

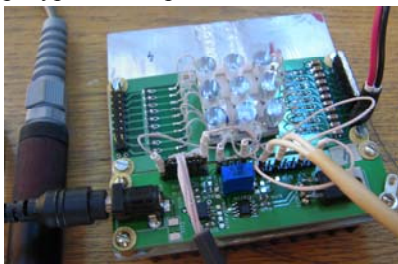
9-КАНАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ ТЕРМОРЕГУЛИРУЕМАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОВКА ДЛЯ КАЛОРИМЕТРИИ

Батурицкий М.А.¹, Литомин А.В.¹, Терехов Г.С.²

¹Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,
Минск, Беларусь,

²ОАО «МНИПИ», Минск, Беларусь,
m_batouritski@hep.by

В электромагнитном калориметре эксперимента NICA-MPD на планируемом ускорительном комплексе NICA (ОИЯИ, г. Дубна, Россия), в качестве фотоприемников предполагается использовать многопиксельные лавинные фотодиоды типа MAPD (Multipixel Avalanche Photodiodes). Для обеспечения долговременной стабильности регистрируемых сигналов необходима их термостабилизация с точностью не хуже 1 % в заметном интервале температур (например, в установке COMPASS в ЦЕРН температура летом доходит до +35 °С при разности между дневными и ночными температурами до 15 °С). При этом важно время установления рабочей температуры диодов температуры и контроль недостижения точки росы.



Для этих целей разработан опытный образец оптической гибридной головки для регистрации сигналов в модуле электромагнитного калориметра, проектируемого для экспериментов на ускорительном комплексе NICA. Конструктивно гибридная головка представляет собой (см. рисунок)

игольчатый радиатор с расположенными на нем печатными платами, изолированными от радиатора пенополиуретановой пластинкой производства НИИ ПФП БГУ, элементом Пельтье, подключенным горячей стороной к радиатору и холодной стороной к медной пластинке, по размеру совпадающей с приклеенной к ней сверху поликоровой подложкой, на которой установлено девять фотодиодов (ЛФД) типа MAPD-3N и два датчика температуры Pt1000 и Pt100. Эффективный тепловой контакт между поверхностями осуществляет кремнийорганическая теплопроводная паста КПТ-8. К фотодиодам оптически прозрачным клеем (слой 100 мкм) приклеены конуса Уинстона, направляющие свет на ЛФД от девяти жгутов диаметром 6,5 мм, состоящих из 17 оптических волокон – 16 от калориметра и одно

для тестового сигнала от светоизлучающего диода. Обеспечиваемая эффективность светосбора более 90 %.

Измерение и индикация температуры t_1 и относительной влажности окружающего воздуха RH (датчик t_1 и RH показан в левой части рисунка), вычисление температуры точки росы t_d и температуры гибридной матрицы ЛФД и температуры t_2 – температуры поликоровой подложки, равной температуре кристаллов MAPD-3N, производится гигрометром-термометром ГТЦ-2.

Особенностью данной оптической головки является гибридная микросхема, содержащая матрицу 3×3 лавинных фотодиодов MAPD-3N, кристалл которого имеет размеры $3 \times 3 \text{ мм}^2$, количество ячеек ~ 135000 , напряжение питания $\sim 90 \text{ В}$, усиление $5\text{--}7 \times 10^4$, одноэлектронные темновые шумы 5 МГц, емкость 100–200 пФ и квантовая эффективность 25 % на длине волны $\lambda \sim 520 \text{ нм}$.

Система испытана при температуре 25 °С. Время установления температуры 14,1 °С – не более 1 мин. при точности поддержания $\pm 0,1 \text{ °С}$. Средняя потребляемая мощность – 1,75 Вт, максимальная потребляемая мощность 2,75 Вт.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ЛЯП ОИЯИ (г. Дубна, Россия) Анфимову Н.В. и Крумштейну З.В. за помощь, оказанную в данной работе.

РОССИЙСКИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ФЭУ – РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО МЭЛЗ

Белянченко С.А.¹, Ильевский В.А.¹,
Лубсандорджиев Б.К.², Рыкалин В.И.³

¹ООО «МЭЛЗ ФЭУ», Москва, Россия.

²ИЯИ, Москва, Россия,

³ИФВЭ, Протвино, Россия,
bel-pmt@yandex.ru

Одной из последних разработок МЭЛЗа является ФЭУ, предназначенный для регистрации наносекундных световых импульсов, генерируемых нейтрино в рабочем объеме детектора глубоководного нейтринного телескопа по проекту KM3Net. Данный фотоумножитель выполнен в стеклооболочке с диаметром рабочей площади фотокатода 3 дюйма (76 мм) и радиусом его кривизны 43,2 мм. Габаритная длина без штырьков 105 мм, внешний диаметр горловины 52 мм. В данном ФЭУ используется электронно-оптическая система линейного типа с 10 диодами и подфокусирующим электродом на ее входе, которая смонтирована на керамике, имеет сетчатый анод, работающий на отражении. Спектральный диапазон чувствительности бищелочного фотокатода 320–650 нм. Спектральная чувствительность на длине волны 404 нм не менее 130 мА/Вт. Коэффициент усиления не менее 5×10^6 . Длительность импульса на его полувывсоте не более 3 нс.

Представляет интерес для потребителя ФЭУ-86У с залитым компаундом делителем напряжения. Имеет диаметр фотокатода 16 мм при максимальном диаметре 22 мм и массе не более 50 г. Световой эквивалент шума темнового тока анода составляет не более 5×10^{-13} лм/Гц^{1/2}, а скорость счёта темновых импульсов на уровне одноэлектронного пика – не более 300 1/с, что по всей совокупности параметров позволяет считать ФЭУ-86У лучшим пороговым фотоумножителем, выпускаемым в России. Активно используется в портативной аппаратуре контроля воздушной среды в закрытых помещениях.

Также широко используются фотоумножители с диаметром колбы 30 мм (диаметр фотокатода 25 мм), это ФЭУ-85Б и ФЭУ-115М8. Их общей особенностью является наличие бищелочного фотокатода, который позволил улучшить энергетические характеристики изделий. Например, ФЭУ-85Б имеет напряжение питания при световой анодной чувствительности 10 А/лм не более 800 В, а при 100 А/лм – не более

1000 В. Энергетическое разрешение с кристаллом NaI (Tl) 25×25 мм, по ^{137}Cs – не более 8,5%, а энергетический эквивалент собственных шумов не более 1 кэВ.

ФЭУ-115М8 применяется в порталах большой площади для обнаружения радиоактивных объектов в транспортных потоках. При диаметре колбы в 30 мм и посадочной длине не более 67 мм, имеет массу не более 50 г и рабочий диаметр фотокатода не менее 25 мм, что позволяет эффективно собирать свет с большого объема сцинтиллятора с помощью оптического волокна на фотокатод ФЭУ. При рабочем напряжении 1300–1400 В имеет энергетический эквивалент собственных шумов не более 6 кэВ и энергетическое разрешение с кристаллом NaI (Tl) 25×25 мм, по ^{137}Cs – не более 10%. Кроме того, он является альтернативой ранее выпускавшимся другим изготовителем ФЭУ-35 и ФЭУ-35-1, т.к. по сравнению с ними обладает более чем в 2 раза большей спектральной чувствительностью на длине волны 410 нм – 5×10^{-2} А/Вт и меньшим рабочим напряжением.

ООО «МЭЛЗ ФЭУ» также серийно выпускает термостойкие ФЭУ диаметром 20, 30 и 52 мм с рабочими температурами эксплуатации 120, 150 и 200 °С.

ТРЕКОВЫЙ МНОГОПРОВОЛОЧНЫЙ ДРЕЙФОВЫЙ ДЕТЕКТОР С КАТОДНЫМ СЪЕМОМ ИНФОРМАЦИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ GlueX

Бердников В.В.¹, Сомов С.В.¹, Pentchev L.², Zihlmann B.²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия,*

²*Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, USA,
vvberdnikov@gmail.com*

Система дрейфовых камер (Forward Drift Chambers) предназначена для регистрации треков заряженных частиц от распадов экзотических мезонов вылетающих из мишени эксперимента GlueX с углами вплоть до 20°. Регистрация осуществляется многопроводочными дрейфовыми камерами с катодно-стриповым съемом информации. Камеры расположены в объеме сверхпроводящего соленоида и объединены в четыре идентичные секции, расположенные перпендикулярно к оси пучка на разном расстоянии от мишени. Каждая секция состоит из шести независимых плоских дрейфовых камер, повернутых под углом 60° по отношению друг к другу. Для минимизации вещества в объеме камеры катодные плоскости изготовлены из каптона толщиной 25 мкм, на катодную плоскость нанесены полоски (стрипов) из чистой меди толщиной 2 мкм. Полное количество материала в активной области составляет 1.64 X.

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПЕРВИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ ЭКСПЕРИМЕНТА GlueX

Бердников В.В.¹, Сомов С.В.¹, Pentchev L.², Zihlmann B.²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,*

Москва, Россия,

²*Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, USA,*

vvberdnikov@gmail.com

Экспериментально показана возможность измерения первичной ионизации в дрейфовых камерах с катодно-стриповым съемом информации эксперимента GlueX. Камеры заполнены смесью 40% Ar + 60% CO₂. Ионизация измеряется методом счета кластеров на треке релятивистской частицы. По полученным данным приведены результаты расчета идентификации пионов каонов и протонов в важном для эксперимента диапазоне импульсов частиц 2 до 10 ГэВ/с.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ КИНЕТИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ АТОМАРНЫХ КРИОКРИСТАЛЛОВ, СТИМУЛИРОВАННЫХ АВТОЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ

Близнюк О.Н., Масалитина Н.Ю., Огурцов А.Н.,
Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина,
onbliznjuk@ukr.net

Определение кинетических параметров процесса образования дефектов в радиационной технологии модификации структуры кристаллов облучением является одной из центральных проблем при внедрении в производство современных достижений радиационной физики и химии и предусматривает аналитическое исследование процессов, происходящих в образцах, на модельных системах. Классической системой для такого моделирования являются атомарные кристаллы инертных элементов, технологическое использование которых в настоящее время только начинается, но спектроскопические характеристики радиационно-индуцируемых процессов в которых уже достаточно подробно исследованы [1]. В предыдущих работах использование кинетического анализа процесса дефектообразования в стационарных условиях позволило обнаружить агрегацию дефектов и формирование дефектной фазы в облучённых кристаллах [2]. Но стационарная кинетика может дать лишь предварительную информацию о механизмах процессов структурных превращений в образцах, поскольку она отображает лишь лимитирующие стадии процесса, и практически не даёт информации о быстрых, нелимитирующих стадиях процесса структурной перестройки образцов.

В данной работе предлагается использовать оптическое детектирование нестационарной кинетики дефектообразования с использованием соответствующей кинетической модели формирования точечного дефекта. В предлагаемой модели процесс образования точечного дефекта рассматривается как результат трёх процессов: (i) локализация мобильного электронного возбуждения, E , с константой скорости k_1 на центре захвата, T , и формирование возбуждённого метастабильного локального центра, MTE , который можно рассматривать как метастабильный короткоживущий дефект образца; (ii) радиационный распад короткоживущего MTE -центра, при котором образец возвращается в исходное состояние с константой скорости k_{-1} ; (iii) радиационный

распад MTE -центра, при котором формируется постоянный дефект D (пара Френкеля) с константой скорости k_2 . В таком случае кинетика процесса описывается кинетическим уравнением

$$d(n_{MTE})/dt = k_1 n_E n_T - (k_{-1} + k_2) n_{MTE},$$

где n_E , n_T , n_{MTE} — концентрации мобильных электронных возбуждений, центров захвата и мобильных локализованных возбуждений, соответственно [3]. В докладе будут приведены аналитическое решение кинетического уравнения и применение данной модели для кинетического анализа радиационных повреждений в криокристаллах ксенона, аргона и неона, стимулированных процессами автолокализации экситонов и дырок. Предложенная методика позволяет однозначно интерпретировать полученные параметры нестационарной кинетической модели. Данный метод позволяет проводить качественный и количественный анализ и сертификацию образцов, что является необходимым условием для сравнения данных экспериментов с разными образцами, и может быть использован при разработке дистанционного непрерывного аналитического метода контроля состояния образцов под облучением.

1. А.Н. Огурцов, *Модификация криокристаллов электронными возбуждениями*: монография, 368 с., Харьков: НТУ "ХПИ", (2009).
2. A.N. Ogurtsov, N.Yu. Masalitina, O.N. Bliznjuk, *Low Temp. Phys.*, **33**, № 6/7, 689–693, (2007).
3. Н.Ю. Масалитина, А.Н. Огурцов, О.Н. Близняк, А.А. Хлопицкий, *Вопр. химии и хим. технологии*, №1, 166–170, (2013).

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЁНОК $\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ КАК ВОЗМОЖНЫЙ НОВЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

Васильев Д.А.¹, Спасский Д.А.^{2,6}, Воронов В.В.³,
Соколов В.О.⁴, Хахалин А.В.⁵,
Васильева Н.В.³, Плотноченко В.Г.⁴

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*

² *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,*

³ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия,*

⁴ *Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия,*

⁵ *Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,*

⁶ *Институт физики Тартуского университета, Тарту, Эстония, dimaphys@gmail.com*

Оптические свойства сцинтиллятора $\text{Gd}_3(\text{Ga,Al})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ 1% продолжают изучать в зависимости от соотношения Ga/Al для более четкого понимания процессов преобразования энергии возбуждения в сцинтилляционный отклик и влияния тушения люминесценции на эти процессы. В статье [1] показано, что наибольшая интенсивность люминесценции наблюдается в материале $\text{Gd}_3(\text{Ga,Al})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ при 40% замещении алюминия галлием. Оптические свойства $\text{Gd}_3(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ также были исследованы для ряда эпитаксиальных пленок с $x = 0.00, 0.22, 0.31, 0.38$ ф.е., выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденных растворов-расплавов на основе $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ с концентрацией оксида алюминия $\text{C}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ от 1,0 до 2,0 моль.% в шихте [2]. В статье показано, что с увеличением концентрации алюминия в составе пленки увеличивается сдвиг полос поглощения уровней $5d_1$ и $5d_2$ иона Ce^{3+} , а также происходит расширение запрещенной зоны за счет поднятия её потолка.

Целью данной работы являлось выращивание методом жидкофазной эпитаксии пленок $\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ из переохлажденных растворов-расплавов на основе $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ с $\text{C}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ от 2,1 до 5,0 моль.% и исследование оптического поглощения и люминесценции в них.

В работе были выращены 60 пленок на подложках из гадолиний-галлиевого граната с ориентацией (111) из 12 растворов-расплавов с концентрацией оксида церия 0,03 и 0,2 мол.%. Спектры пропускания пленок измеряли на спектрофотометре Lambda-900 при комнатной

температуре. В спектрах поглощения пленок $\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ наблюдалась полоса поглощения ионов Pb^{2+} с максимумом на длине волны 280 нм, соответствующая электронному $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ переходу, а также две полосы поглощения иона Ce^{3+} , соответствующие разрешенным $4f \rightarrow 5d$ переходам. Люминесценцию пленок измеряли на установке с использованием монохроматора МДР-2 и на установке люминесцентной спектроскопии твердых тел при комнатной температуре. Наивысшая интенсивность люминесценции наблюдалась в пленке $\text{Pb}_{0,02}\text{Ce}_{0,05}\text{Gd}_{2,93}\text{Al}_{2,78}\text{Ga}_{2,22}\text{O}_{12}$ (44 % замещения галлием). Определение химического состава пленок проводилось при помощи электронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 3D FEG фирмы FEI.

Работа поддержана Программой Развития МГУ имени М.В. Ломоносова. Параметры решётки и монокристалличность плёнок измеряли с помощью рентгеновского дифрактомера Bruker D8 Discover A25 Da Vinci Design.

1. Ogieglo Joanna M., Katelnikovas A., Zych, A., Justel Th., Meijerink A., Luminescence and Luminescence Quenching in $\text{Gd}_3(\text{Ga,Al})_5\text{O}_{12}$ Scintillators Doped with Ce^{3+} , *J. Phys. Chem. A*, 2013, 117 (12), pp 2479–2484.
2. Vasil'eva N.V., Spassky D.A., Randoshkin I.V., Aleksanyan E.M., Vielhauer S., Sokolov V.O., Plotnichenko V.G., Kolobanov V.N., Khakhalin A.V. Optical spectroscopy of Ce^{3+} ions in $\text{Gd}_3(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_5\text{O}_{12}$ epitaxial films, *Materials Research Bulletin*, V.48, Issue 11, November 2013, pp 4687–4692.

ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ОРИЕНТАЦИОННО УПОРЯДОЧЕННЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ БИОМАТЕРИАЛОВ

Васин А.А., Классен Н.В., Шмытько И.М., Кедров В.В.,

Ершов А.Е., Воронин К.А., Марясевская А.В.

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия,

Астраханский государственный университет, Астрахань, Россия,

Московский государственный университет им.М.В. Ломоносова,

Москва, Россия,

alexcampeones@yandex.com; klassen@issp.ac.ru

Оптические методы регистрации ионизирующих излучений (сцинтилляционные и черенковские) являются двухступенчатыми – т.е. сначала излучение возбуждает в веществе детектора оптический сигнал, который преобразуется в электрический фотоприемниками. Полупроводниковое детектирование, основанное на прямой генерации электрического сигнала при поглощении излучения, одноступенчатое. За счет этого энергетическое разрешение полупроводниковых детекторов в несколько раз лучше, чем сцинтилляционных. Однако полупроводниковые детекторы радиации либо могут работать только при глубоком охлаждении, либо весьма дороги из-за сложной технологии изготовления широкозонных полупроводников. Нами экспериментально продемонстрированы возможности изготовления прямых преобразователей радиации в электричество на основе двух видов ориентированных биоматериалов: композитов из электрически активных биомолекул и наночастиц, ориентированных в процессе синтеза внешним электрическим полем, и нанокompозитов на основе микрокапиллярных матриц, полученных пиролизом древесины, с заполнением микрокапилляров наноразмерными поглотителями радиации. В первом случае электрический сигнал формируется за счет пространственного разделения неравновесных электрон-дырочных пар, генерированных при поглощении радиации, во внутреннем электрическом поле от электрически активных наночастиц и биомолекул, ориентированных внешним полем по принципу формирования электрета. В работе исследуется зависимость электрических сигналов, получаемых при рентгеновском облучении такого рода электретов, от их химического состава, морфологии расположения и относительных концентраций наночастиц и биомолекул. В качестве биомолекул использовались

коллаген, хитозан, ДНК. Электрически активными наночастицами служили сегнето-электрические титанаты бария и свинца, пироэлектрические теллуриды и сульфиды кадмия и цинка.

В случае биоморфных микрокапиллярных матриц разделение зарядов происходило за счет преимущественного поглощения ионизирующих гамма-квантов внутренними сердцевинами, куда через расплав или раствор были введены тяжелые элементы с большими атомными номерами (свинец, висмут). При поглощении гамма-квантов тяжелыми атомами сердцевины возникают неравновесные электроны, часть которых захватывается межкапиллярными стенками, заряжая их отрицательно, в то время как в сердцевине за счет этого создается положительный заряд. Возникающая между стенками и сердцевинами капилляров разность потенциалов формирует электрический сигнал, определяющийся интенсивностью поглощения излучения сердцевинами. Если в первом случае композитного электрета суммарный сигнал есть результат последовательного соединения генерированных облучением внутренних диполей и система представляет собой генератор ЭДС, то во втором случае сигнал формируется суммарным током от параллельно соединенных микрокапилляров. На основе полученных результатов проводится сравнение характеристик исследуемых систем с существующими радиационными детекторами и предлагаются варианты их практического использования. Несомненными достоинствами новых типов преобразователей являются относительная простота их изготовления, низкая себестоимость, отсутствие ограничений по размерам.

ФОТОНЕЙТРОНЫ ВОКРУГ МЕДИЦИНСКОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Веренич К.А., Миненко В.Ф., Хрущинский А.А., Кутень С.А.
Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,
kiryl_verenich@tut.by

При медицинском использовании тормозного излучения, создаваемого линейным ускорителем электронов с энергий выше 10 МэВ, в поле терапевтического пучка и вокруг ускорителя появляется нежелательное вторичное нейтронное излучение.

Нейтроны образуются преимущественно на элементах выходной головки ускорителя, главным образом, в результате взаимодействия гамма-квантов с ядрами атомов материалов мишени, формирующих устройств и защиты, в процессе так называемого гигантского дипольного резонанса [1]. Помимо элементов ускорителя источниками образования нейтронов становятся тело облучаемого пациента, стены, пол и потолок лечебного помещения ускорителя.

В связи с особой опасностью нейтронного излучения важно знать вклад нейтронов в терапевтический пучок для оценки дозы облучения пациента, а также их вклад в рассеянное излучение внутри и вне лечебного помещения для оценки доз облучения персонала и населения.

Исходными характеристиками для таких расчетов являются флюенс и средняя энергия фотонейтронов в некоторых точках, характеризующих неоднородность поля.

С использованием метода Монте-Карло моделирования транспорта частиц проведена оценка вклада вторичных нейтронов в терапевтический пучок и в поле рассеянного излучения вокруг головки медицинского линейного ускорителя Клинак-2300С с энергией электронов 18 МэВ. Моделирование проводилось с помощью пакета MCNP. Для расчетов была разработана детализированная модель головки ускорителя Клинак-2300С и помещения бункера с соблюдением всех размеров.

Расчеты основаны на создании эффективного поверхностного источника фотонейтронов. Он представляет собой массив данных о начальных положениях, направлениях движения и энергиях нейтронов на сфере, окружающей головку ускорителя. Флюенс фотонейтронов и их средняя энергия рассчитаны для двух вариантов геометрии: с учетом стен, пола и потолка и без их учета.

В докладе приводятся результаты расчетов флюенса и спектра фотонейтронов и сравнение с данными литературы.

1. Mao, X.S., Kase, K.R., Nelson, W.R. Giant dipole resonance neutron yields produced by electrons as a function of target material and thickness. Health Phys. 70:207–214 (1996).

ПРИБОРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ ЙОДА В ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЕ ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ НЕСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ДОЗИМЕТРОВ

Веренич К.А.¹, Миненко В.Ф.¹, Жуковский А.И.²,
Хрущинский А.А.¹, Кутень С.А.¹

¹*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,*

²*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,*

Минск, Беларусь

kiryl_verenich@tut.by

Йод хорошо накапливается щитовидной железой (ЩЖ) человека. Поэтому в случае радиационной аварии на АЭС лица, находящиеся в зоне поражения, могут подвергнуться воздействию выброшенных в атмосферу радионуклидов йода. Активность йода в ЩЖ служит показателем степени этого воздействия.

Существуют специализированные гамма-спектрометры, позволяющие измерять активность короткоживущих радиоизотопов йода в ЩЖ путем измерений в непосредственной близости от нее. Предлагается определять активность косвенно с помощью неспециализированных дозиметрических приборов, которые в достаточном количестве имеются в центрах гигиены и эпидемиологии. В частности, могут быть использованы дозиметры с блоками детектирования БДКС-96 (с сцинтилляционным пластиком) и БДКГ-05 (йодид натрия).

С помощью программы MCNP были разработаны компьютерные модели блоков детектирования БДКС-96 и БДКГ-05.

При моделировании прибора и источника в некоторой конкретной обстановке необходимо максимально точно учитывать: геометрию прибора, химический состав сцинтиллятора и химический состав элементов конструкции. Обычно в органический сцинтиллятор добавляются так называемые компенсирующие примеси для изменения отклика в низкоэнергетической части спектра так, чтобы приблизить свои показания к керме в ткани (тканезквивалентный сцинтиллятор). Точный состав и содержание примесей в какой-то мере являются технологическим секретом фирм, изготавливающих блоки детектирования. Было проведено сравнение рассчитанного хода с жесткостью и приведенного в паспорте к БДКС-96. Получено, что содержание в сцинтилляторе свинца составляет 0,5 % от общей массы сцинтиллятора.

При моделировании процессов измерения радиометрическими приборами в различных ситуациях необходимо знать так называемый приборный коэффициент. Этот коэффициент равен отношению выделенной в сцинтилляторе энергии к показанию мощности дозы. Этот коэффициент не зависит от активности источника и геометрии.

Приборные коэффициенты для БДКС-96 и БДКГ-05 были определены полуэкспериментальным образом. Для этого этими приборами измерялась мощность дозы от образцовых источников гамма-излучения ОСГИ (^{241}Am , ^{137}Cs и ^{60}Co) в определенной геометрии. И для этой же геометрии методом Монте-Карло была рассчитана выделенная на одну частицу энергия, из которой был рассчитан приборный коэффициент. Измерения проводились для разных расстояний «источник–детектор», для каждого расстояния измерения мощности дозы проводились несколько раз.

Для БДКС-96 приборный коэффициент равен 57 МэВ/(мкЗв/ч), для БДКГ-05 – 270,9 МэВ/(мкЗв/ч). Полученные значения приборных коэффициентов были использованы при расчетах функций отклика и калибровочных коэффициентов радиометрических приборов для оценки содержания короткоживущих радиоизотопов йода в ЦЖ.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МАРГАНЦА В ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ МАТЕРИАЛЕ $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА НЕЛИНЕЙНОСТИ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛИКА ОТ ДОЗЫ

Верещагина Н.^{1*}, Зубов А.², Данилкин М.^{2,3}, Керикмяэ М.³,
Луст А.³, Семан В.⁴

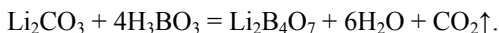
¹*РХТУ им. Д.И.Менделеева, Москва, Россия,*

²*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия,*

³*Институт химии Тартуского университета, Тарту, Эстония,*

⁴*Институт физики Тартуского университета, Тарту, Эстония,*
**ilthar@mail.ru*

Термолюминесцентные детекторы (ТЛД) на основе $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ имеют очень хорошую тканеэквивалентность ($Z_{\text{эфф}}=7.4$), что важно для персональных дозиметров. Что касается зависимости светосуммы от дозы, то в области доз 0.01 Gy-1 Gy может наблюдаться сверхлинейность [1]. Наши исследования показали, что марганец легко образует скопления в решётке тетрабората лития. Эти кластеры двухвалентного марганца охвачены обменным взаимодействием, содержат различное число по-разному ориентированных ионов Mn^{2+} , и проявляются в ЭПР как очень широкая бесформенная линия. В люминесценции кластеризация марганца проявляется в красном сдвиге и неоднородном уширении спектра свечения марганца. Структура и взаимное расположение центров захвата при кластеризации марганца также усложняются, что порождает конкурирующие процессы рекомбинации и нелинейность дозовой зависимости. Причины образования скоплений марганца при синтезе тетрабората лития связаны с особенностями технологии детекторов на основе $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$. Эффекты кластеризации марганца могут наблюдаться уже при таких его низких концентрациях, как 0.02–0.05 мол.%. Обычно тетраборат лития получают по реакции:



Типично используют горячий раствор борной кислоты, в который постепенно добавляют карбонат лития и соль марганца. Нам удалось показать, что кластеризация марганца наиболее сильно выражена в тех случаях, когда марганец вводится в раствор раньше, чем образуются зародыши микрористаллов тетрабората лития. При равномерном добавлении марганца, начатом после образования зародышей кристаллов, свойства получаемого термолюминофора меняются: в

спектре ЭПР наблюдаются интенсивные линии марганца как в позиции лития, так и в позиции бора [2], а интенсивность широкой бесформенной линии уменьшается. Одновременно улучшается и линейность дозовой зависимости светосуммы.

Детекторы на основе $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ с улучшенными свойствами могут найти применение не только в персональной, но и в нейтронной дозиметрии, где линейность дозовой зависимости имеет важное значение.

1. M. Danilkin, I. Jaek, M. Kerikmäe, A. Lust, H. Mändar, L. Pung, A. Ratas, V. Seeman, S. Klimonsky, V. Kuznetsov. Storage mechanism and OSL-readout possibility of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ (TLD-800), *Radiation Measurements*, 2010, **45**, 562–565.
2. Ratas, A., Danilkin, M., Kerikmäe, M., Lust, A., Mändar, H., Seeman, V., Slavin G. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ for dosimetry applications: traps and mechanisms. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2012, **61**, 4, 279–295.

ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В КРИСТАЛЛАХ И НАНОКРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА ЛИТИЯ

Войтович А.П.¹, Калинов В.С.¹, Коржик М.В.²,
Новиков А.Н.¹, Рунец Л.П.¹, Ступак А.П.¹

¹*Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ, Минск, Беларусь,*

²*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,
v.kalinov@ifanbel.bas-net.by*

Благодаря своим физическим и оптическим свойствам кристаллы фторида лития с радиационными дефектами (центрами окраски (ЦО)) широко используются в электронике, дозиметрии и лазерной технике. Поэтому процессы формирования ЦО в объеме LiF исследуются на протяжении многих лет и хорошо изучены. Для таких применений, как волноводы, структуры с высоким пространственным разрешением используется фторид лития с ЦО в приповерхностных и поверхностных слоях кристалла. Дефекты в поверхностных слоях могут также влиять на каталитические свойства поверхности, служить в качестве центров кристаллизации и использоваться для создания наноструктур.

Исследовались монокристаллы и нанокристаллы фторида лития при облучении гамма-квантами в условиях неподвижности анионных вакансий. Для удобства проведения экспериментов при облучении образцы охлаждались до температуры жидкого азота (LNT). Изучены радиационные центры окраски, формирующиеся в объеме кристаллов и в приповерхностном слое нанокристаллов. Измерены спектры люминесценции и возбуждения люминесценции поверхностных дефектов. Полученные данные свидетельствуют о том, что в нанокристаллах фторида лития во время облучения при LNT формируются радиационные дефекты с характеристиками, не наблюдаемыми для ЦО в объеме кристалла. Установлены количества анионных вакансий и электронов, входящих в состав таких центров. Определено, что образуются F_{S1} , F_{S1}^- , F_{S2}^+ , F_{S2} , F_{S2}^- , F_{S3}^+ и F_{S3} поверхностные центры (в обозначениях F_n^- , F_n^+ , F_n для ЦО нижний индекс "n" – это число положительно заряженных вакансий v_a , входящих в дефект; верхний символ "+" или "-" (отсутствие символа) означает недостаток или избыток (равенство) электронов в дефекте по сравнению с числом вакансий; s обозначает поверхностный дефект). В нанокристаллах в

отличие от монокристаллов во время облучения при LNT формируются двухвакансионные центры. Это, по-видимому, свидетельствует о более эффективном образовании радиационных дефектов на поверхности по сравнению с объемом. Показано, что спектры люминесценции и возбуждения люминесценции поверхностных ЦО, содержащих более одной анионной вакансии, отличны от соответствующих спектров для центров в объеме. Одно из существенных отличий состоит в том, что спектры возбуждения люминесценции поверхностных ЦО имеют две (F_{S2}^+ и F_{S2} центры) или три (F_{S2}^- , F_{S3}^+ и F_{S3} центры) полосы с близкими интенсивностями. Вероятной причиной расщепления спектров возбуждения люминесценции является асимметрия поля в приповерхностном слое. Различий в спектрах поглощения простейших поверхностных (F_{S1}) и объемных (F_1) дефектов не обнаружено.

Определена поляризация фотолюминесценции при комнатной температуре для центров F_{S3}^+ и F_{S2}^+ , которые существуют в нанокристаллах после полного пострadiационного отжига образцов и чьи спектры удастся однозначно выделить. Измерялись зависимости степени P поляризации фотолюминесценции на длинах волн $\lambda_{\text{рег}} = 670$ и 900 нм от длины волны возбуждающего излучения в ансамбле нанокристаллов различной ориентации.

Исследованы реакции поверхностных центров как с электронами, так и с анионными вакансиями.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (ИИ)

Волков В.Г.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
volkov@isma.kharkov.ua*

Сцинтилляционные методы измерений широко используются в технике регистрации ионизирующих излучений. Огромная номенклатура широко применяемых комбинаций различных сцинтилляторов, световодов и фотопреобразователей порождает существенные различия во временных, спектральных и статистических характеристиках электрических сигналов рассматриваемых детекторов.

Целью работы является разработка математической модели сигналов сцинтилляционного детектора, максимально позволяющей реализовать потенциальные характеристики сцинтилляционных детекторов ИИ.

Особенностью предлагаемой автором модели является описание всех этапов переноса энергии ИИ в терминах электрических цепей. То есть потоки частиц ИИ и световые кванты моделируются электрическими зарядами, процессы генерации и преобразования эквивалентными схемами, включающими нелинейные элементы, эквивалентные генераторы заряда или тока.

Модель сигналов с учетом поступления частиц по закону простейшего потока примет вид:

$$\varphi(t) = M\eta K_V Q_j^E E_j S_i(E) \Phi_0 \sum [(A_k/\tau_k) \exp(-(t-t_i)/\tau_k)] \int \delta(t-t_i) dt,$$

где $\delta(t_i)$ – дельта-функция, не равная нулю в моменты t_i ; $\int \delta(t-t_i) dt = \theta(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Подчеркнём конкретизированный характер выражения. В модели содержится сумма экспонент, которая обусловлена свойствами сцинтиллятора (закон затухания сцинтиллятора). Имеется случайная функция $S_i(E)$, которая обусловлена свойствами конкретного детектора (функция распределения как нормированная спектрограмма детектора при воздействии конкретного потока излучения), и функция $\int \delta(t-t_i) dt$, которая характеризует свойства потока ИИ[1]. В интеграле $\theta(t)$ закон вычисления t_i может быть изменен, если поток будет другим.

Выводы

1. На основе представления всех этапов переноса энергии ИИ в терминах электрических цепей была синтезирована математическая модель сигналов сцинтилляционных детекторов.

2. Предложенная математическая модель сигналов сцинтилляционных детекторов позволяет анализировать процесс их обработки в электронных трактах вплоть до выделения необходимой информации.

3. При подстановке в модель параметров конкретных сцинтилляторов и фотоприемников, имеется возможность оптимизации параметров каскадов обработки с целью достижения максимального отношения сигнал–шум и, таким образом, максимального использования потенциальных возможностей конкретного сцинтилляционного детектора.

1. Математическое моделирование: Методические указания к лабораторным работам / авт.-сост. В.В. Апанасович, С.В. Гилевский, В.М. Лутковский, С.М.Мельников. Мн.: БГУ, 2003. 28 с.

СМЕШАННЫЕ ТАНТАЛО-НИОБАТЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Волошина О.¹, Бояринцева Я.¹, Иванов А.¹,
Спасский Д.^{2,3}, Сидлецкий О.¹

¹*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,*

²*Институт физики, Тартуский Университет, Тарту, Эстония,*

³*НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобелевича МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия,*

ivoloshina@isma.kharkov.ua

Соединениям с общей формулой $REAO_4$, где RE – редкоземельный элемент, А – переходный металл, свойственна собственная люминесценция, связанная с эмиссией групп AO_6 . Известно, что наибольшей плотностью в ряду сложных оксидов РЗЭ и переходных металлов обладают танталаты РЗЭ (например, $\rho(LuTaO_4)=9,34 \text{ г/см}^3$), а самую яркую люминесценцию демонстрируют ниобаты РЗЭ [1, 2].

Можно ли объединить преимущества обоих соединений и в результате получить яркий и плотный сцинтиллятор? В качестве инструмента для решения подобной задачи можно использовать получение твердых растворов на основе танталатов и ниобатов иттрия или гадолиния. Свойством многих твердых растворов и смешанных кристаллов на их основе является существенное изменение сцинтилляционных характеристик в сравнении с исходными соединениями. Например, для смешанного гадолиний алюмо-галлиевого граната было зарегистрировано рекордное для оксидных кристаллов значение световыхода 56500 фот/МэВ [3].

Целью данной работы явилось исследование люминесцентных и сцинтилляционных характеристик смешанных тантало-ниобатов иттрия и гадолиния.

В ходе выполнения работы были получены керамические образцы тантало-ниобатов иттрия и гадолиния с содержанием ниобия в матрице 0, 20, 40, 60, 80 и 100 ат%. На спектрах люминесценции тантало-ниобатов иттрия и гадолиния как при УФ, так и при рентгеновском возбуждении наблюдается пик с максимумом в области 420–450 нм, связанный с люминесценцией группы NbO_6 . Люминесценция группы TaO_6 регистрируется только в керамиках без содержания ниобия в своем составе, что свидетельствует об эффективном переносе энергии от группы TaO_6 на группу NbO_6 с последующим полным тушением люминесценции группы TaO_6 .

В работе показана зависимость люминесцентных и сцинтилляционных свойств смешанных тантало-ниобатов иттрия и гадолиния в зависимости от соотношения Ta/Nb в матрице. Наибольший относительный световыход был определен для тантало-ниобатов иттрия с содержанием ниобия в матрице от 20 ат% до 60 ат% и для тантало-ниобатов гадолиния с содержанием ниобия более 40 ат%. В целом, наилучшие характеристики продемонстрировал тантало-ниобат гадолиния с содержанием ниобия 20 ат% – высокая плотность около $8,5 \text{ г/см}^3$, световыход, на порядок превышающий световыход известного сцинтилляционного материала PbWO_4 , и время затухания люминесценции 12 нс без медленной компоненты. Таким образом, соединение $\text{GdNb}_{0,2}\text{Ta}_{0,8}\text{O}_4$ может рассматриваться как перспективное для применений в экспериментах физики высоких энергий.

1. G. Liu, B. Jacquier, Spectroscopic Properties of Rare Earths in Optical Materials, Springer, Tsinghua University Press, 2005.
2. G. Blasse and A. Brill, J. Lumin. 3 (1970), 109–131.
3. O. Sakthong, W. Chewpraditkul, C. Wanarak, J. Pejchal, K. Kamada, A. Yoshikawa, G.P. Pazzi and M. Nikl, Optical Materials. 36 (2013), 568–571.

ИНЖЕНЕРИЯ ГИГРОСКОПИЧНЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ С ВЫСОКИМ СВЕТОВЫМ ВЫХОДОМ

Галенин Е.¹, Романчук В.¹, Цой Е.³, Маслов В.², Маслов Д.²,
Смирнов Н.¹, Стадник П.¹, Гектин А.¹

¹Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
²ПАО "НПО«Йодобром»", ³ООО "НПП «Технопромприбор»", Саки, Крым,
galenin@isma.kharkov.ua

Сцинтилляционные кристаллы $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ обладают высоким световым выходом до 120000 фот/МэВ и энергетическим разрешением 2,6% при возбуждении гамма-квантами 662 кэВ [1]. Такие кристаллы перспективны для создания нового поколения систем контроля и предотвращения распространения радиационных источников. Также $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ обладает высокой температурной стабильностью светового выхода [2], что делает его перспективным для применения в геологоразведке.

Исходные компоненты кристалла $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ являются чрезвычайно гигроскопичными и склонными к окислению компонентами воздуха. Поэтому для выращивания качественных сцинтилляционных кристаллов $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ используют высокочистые (99,99% или лучше) ультрасухие соли SrI_2 и EuI_2 [1, 3], которые имеют высокую стоимость (более 1000 \$/кг). Кристаллы, полученные из таких солей, не могут быть использованы для разработки новых сцинтилляционных устройств по причине своей дороговизны. Для обеспечения потребностей сцинтилляционного приборостроения новыми кристаллами необходимо использовать менее дорогое сырье (до 500 \$/кг) приемлемого качества для сцинтилляционного применения. Существующие методики производства исходных солей отсутствуют в свободном доступе и закрыты для обсуждения оптимизации их себестоимости, поскольку являются коммерческими секретами фирм-производителей. Поэтому задача поиска недорогих методов синтеза исходных солей и их оптимизация с целью обеспечения сцинтилляционного качества получаемых кристаллов является актуальной.

В данной работе отражено влияние способа получения исходной соли SrI_2 на свойства сцинтилляционных кристаллов $\text{SrI}_2:\text{Eu}$. Для синтеза безводной соли исходный раствор получали из различных компонентов: SrCO_3 , $\text{Sr}(\text{OH})_2$, HI , I_2 . Для обезвоживания раствора использовали методику, описанную в [4]. Далее проводили выращивание кристаллов SrI_2 и $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ и исследовали их оптические, люминесцентные и сцинтилляционные свойства.

Было установлено, что в качестве исходных компонентов более перспективно использовать те, которые не содержат углерод. Были получены кристаллы $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ диаметром до 26 мм и длиной до 70 мм (Рис. 1), энергетическое разрешение составляло 4,4% при возбуждении источником ^{137}Cs .

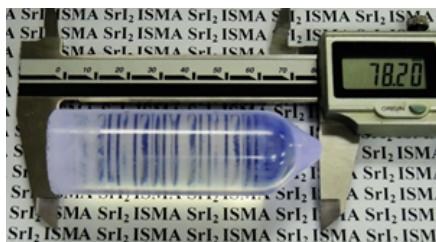


Рис. 1. Кристалл $\text{SrI}_2:\text{Eu}$ диаметром 26 мм

1. Edgar V. Van Loef at. IEEE Trans. on Nucl. Sc., V. 56, 3, 2009, 869–872.
2. M.S. Alekhin, at al, DOI: 10.1109/NSSMIC.2010.5874044.
3. E.V. van Loef, at al, IEEE TNS, VOL. 56, NO. 3, JUNE 2009.
4. R. Hofstadter. U.S. Patent No. 3,373,279, 12 March 1968.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ZnSe ДЛЯ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Галкин С.Н., Рыбалка И.А., Лалаянц А.И., Зверева В.С.
*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
galkin@isma.kharkov.ua*

Кристаллы селенида цинка проходят тестирование в подземной лаборатории Гран Сассо в качестве сцинтилляционных болометров для последующего применения в экспериментах по регистрации редких событий – безнейтринного двойного бета-распада. Первые результаты испытаний болометрических сцинтилляционных элементов ZnSe (БСЭ) свидетельствуют о перспективности применения данного материала в проекте «LUCIFER». Были отмечены рекордно низкий радиационный фон БСЭ, высокие уровни сцинтилляционного и фоновых сигналов при воздействии источников гамма, альфа и бета радиации. В качестве тестовых образцов в данных испытаниях брали нелегированные кристаллы ZnSe, выращенные по стандартной методике методом Бриджмена-Стокбаргера. Для дальнейшего выполнения проекта необходимо модернизировать процесс получения кристаллических элементов, а именно разработать методику синтеза бинарного полупроводника из элементов – Zn и ^{82}Se . Отработать стадии выращивания кристаллов с минимальным уровнем термодесорбции шихты, механической обработки кристаллов с обеспечением минимальных возможных потерь материала и вероятности растрескивания заготовки. Кроме этого, необходимо было разработать надежные методики контроля оптических и люминесцентных характеристик БСЭ. Использование обогащенного 82 изотопом селена накладывает серьезные требования к выходу годного продукта на каждой стадии техпроцесса.

В докладе приведены результаты разработки синтеза высокочистой шихты ZnSe квалификации 7N с выходом конечного продукта 99,99 %. Показана возможность снижения потерь шихты при выращивании кристаллов методом Бриджмена-Стокбаргера в 3 раза относительно стандартной методики. Приведены результаты исследований структурного совершенства и болометрических параметров кристаллов в зависимости от условий выращивания и примесного состава. Показано, что кинетические характеристики фоновых сигналов зависят в наибольшей степени от концентрации примесей элементов подгруппы железа и структурного совершенства кристаллов. Приведены объяснения нестандартного Quenching Factor кристаллов селенида цинка.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ СВЕТОВОДЫ

Галунов Н.З.¹, Караваева Н.Л.¹, Хабусева С.У.², Креч А.В.¹,
Лазарев И.В.¹, Левчук Л.Г.³, Попов В.Ф.³, Сорокин П.В.³

¹Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,

²ГНУ НТК «Институт монокристаллов» НАНУ, Харьков, Украина,

³ННЦ «Харьковский физико-технический институт НАНУ, Харьков, Украина,
lazarev@isma.kharkov.ua

С появлением новых видов ускорителей увеличивается дозовая нагрузка на сцинтилляционные материалы. Это приводит к необходимости искать как сцинтилляционные материалы с повышенной радиационной стойкостью, так и радиационно-стойкие световоды. В данной работе впервые рассматриваются радиационно-стойкие световоды на основе органических композиционных материалов.

Наибольшую радиационную нагрузку претерпевает основное по процентному содержанию вещество. Поэтому для создания радиационно-стойких световодов в первую очередь необходимо использовать радиационно-стойкую основу. В качестве основы был выбран диэлектрический гель Sylgard-184. В данную основу помоллекулярно вводится спектро-смещающая добавка. В качестве спектросмещающих добавок вводились такие люминофоры как: РОРОР (1,4-бис-(2-(5-фенилоксазолил))-бензол), *n*-терфенил и 1,4-дифенил-1,3-бутадиен. Спектросмещающие световоды под действием больших доз радиации не должны вносить свой вклад, искажая величину светового выхода сцинтиллятора. Поэтому подбирались такие концентрации люминофоров, чтобы их сцинтилляционный сигнал был крайне низок. С увеличением концентрации добавки возрастает вероятность появления сцинтилляционного сигнала.

У полученных образцов эффективность поглощения для 360 нм составляет ~30%, а для спектрального диапазона собственной люминесценции ~2%. Измерены спектры люминесценции, зависимости светового выхода, прозрачности для различных дозовых нагрузок. Рассмотрены возможные каналы радиационных повреждений этих материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины, проект №Ф58/06.

SCINTILLATION MATERIALS – PRESENT AND FUTURE

Gektin A.

²*Institute for Scintillation Materials NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
gektin@isc.kharkov.com*

This is the review of the last trends in scintillator search and development of the technologies of their obtain.

Last decade reveal a lot of new both halide and oxide scintillation materials that possess with significantly better efficiency comparing to the conventional alkali halides and oxides (with extrinsic and extrinsic luminescence). At the same time no any new scintillators (except LaBr₃:Ca) are commercially available and the cost of new detectors look unreasonably high. This review is directed to description/explanation of:

- physical limits of the scintillation efficiency of alkali halide scintillators,
- explanation of the high efficiency of alkali earth halides,
- new trends in oxide scintillator improvement,
- technological problems related to the crystal growth and hygroscopy of new Eu doped scintillators.

The goal of review is not only to explain current status of developments, problems and current status of this activity, but also the forecast and explanation of the R&D need for the short and medium term future.

ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Горбачева Т.Е., Тарасов В.А., Андриющенко Л.А.

Институт сцинтилляционных материалов НАНУ,

Харьков, Украина,

gorbacheva@isma.kharkov.ua

В работе обобщены литературные данные и приведены результаты собственных исследований, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик и создания нового уровня функциональных возможностей различных детектирующих систем путем разработки и применения кремнийорганических материалов.

Рассматриваются особенности получения оптических контактных и защитных покрытий на основе полиорганосилоксанов, способных выполнять дополнительные функции. Приведены технические решения увеличения механической прочности и высокоэластических свойств полиорганосилоксановых композиций.

Показана перспективность применения олигоорганосилоксанов в качестве основы жидких сцинтилляторов для физики высоких энергий, которые обеспечивают повышение их сцинтилляционной эффективности в 1,3 – 1,6 раз и необходимый уровень пожаробезопасности.

Приведены примеры применения кремнийорганических соединений на различных стадиях технологического процесса получения композитных сцинтилляторов. Отмечены отличительные особенности кремнийорганических соединений с высокими поверхностно-активными свойствами.

Рассмотрены перспективы использования композитных сцинтилляторов на основе органосилоксанов и сцинтилляционных порошков различной размерности. Показано, что гелеобразные сцинтилляционные элементы, разработанные на основе олигоорганосилоксанов и микрокристаллических порошков активированного паратерфенила, имеют значения светового выхода при регистрации β -частиц и эффективность при регистрации быстрых нейтронов, близкие к аналогичным характеристикам монокристалла.

Показано, что пленочные полиорганосилоксановые сцинтилляторы, содержащие наноразмерные частицы неорганических кристаллических порошков, имеют улучшенные кинетические характеристики высвечивания по сравнению с их моно- и микрокристаллическими аналогами.

ПОЛУЧЕНИЕ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ БРОМИДОВ РУБИДИЯ И КАЛЬЦИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ЕВРОПИЕМ

Гриппа А.Ю., Реброва Н.В., Горбачева Т.Е., Педаш В.Ю.,
Чергинiec В.Л., Тарасов В.А.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украины,
a_grippa@mail.ru*

В последние годы в ходе поиска новых неорганических сцинтилляторов много внимания уделялось сложным галогенидам состава $\text{CsMX}_3:\text{Eu}^{2+}$ ($\text{M}=\text{Ca}, \text{Sr}$; $\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$), имеющим структуру перовскита. Это обусловлено тем, что CsMX_3 , активированные Eu^{2+} , могут быть перспективными с точки зрения использования их в качестве гамма-детекторов.

Настоящая работа была посвящена исследованию люминесцентных и сцинтилляционных свойств не изученного ранее $\text{RbCaBr}_3:\text{Eu}^{2+}$, кристаллизующемуся в структуре перовскита. Поскольку данный сложный галогенид плавится конгруэнтно при 742°C , получение кристаллов данного состава представлялось вполне возможным. Шихта для выращивания монокристаллов $\text{RbCa}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Br}_3$ ($0 \leq x \leq 0.08$) готовилась смешиванием исходных галогенидов CaBr_2 , RbBr (осч) и EuBr_2 , взятых в соответствующих стехиометрических пропорциях. Бромиды кальция и европия получались предварительно растворением соответствующих карбонатов в бромистоводородной кислоте с последующим упариванием и сушкой в присутствии NH_4Br . Монокристаллы $\text{RbCa}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Br}_3$ ($0 \leq x \leq 0.08$) выращивались в вакуумированных запаянных кварцевых ампулах методом Бриджмена-Стокбаргера в вертикальных печах с градиентом температур в зоне роста $5^\circ\text{C}/\text{см}$ и температуре на диафрагме 745°C . Скорость движение ампулы вниз составляла 3 мм/ч.

Наилучший световой выход был получен в случае $\text{RbCa}_{0.92}\text{Eu}_{0.08}\text{Br}_3$ и составил 47% от NaI:Tl . Максимум на спектре радиoluminesценции $\text{RbCa}_{0.92}\text{Eu}_{0.08}\text{Br}_3$ соответствует 443.5 нм. Кривая затухания сцинтилляционного импульса описывается одноэкспонентной функцией со временем затухания $(3.5542 \pm 0.0013) \mu\text{s}$.

РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ПИКОВ ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЛИМАТОРОВ С РАЗНОЙ АПЕРТУРОЙ

Гроздов Д.С., Колотов В.П., Лаврухин Ю.Е.

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
Москва, Россия,
dsgrozдов@rambler.ru*

Сцинтилляционные детекторы давно и широко используются не только в лабораторном анализе, но и в полевых измерениях. Несмотря на худшее энергетическое разрешение, по сравнению с полупроводниковыми детекторами, они обладают большей эффективностью регистрации гамма-излучения, значительно дешевле, надежнее при автономном использовании. Обычно при полевых измерениях объект анализа содержит ограниченное по составу число радионуклидов, применение сцинтилляторов является оправданным. В последнее время разработаны различные математические методики калибровки сцинтилляционных детекторов по эффективности регистрации пиков полного поглощения (ППП) [1, 2, 3]. При этом используются различные геометрические шаблоны статичных объектов (плоские поверхности, прямоугольные коробки, бочки, трубы и т.д.).

Задачей исследования являлась разработка способа расчета эффективности регистрации ППП сцинтилляционным детектором с использованием коллиматоров с разной апертурой для полевого анализа атмосферных динамических объектов (например, непрерывных атмосферных выбросов АЭС).

В качестве детектора использовался сцинтилляционный детектор NaI(Tl) размером 63*63 мм. В качестве условного коллиматора использовался свинцовый цилиндр с внутренним радиусом 15 см и толщиной стенок 10 см. В качестве калибровочного источника использовали точечный источник ^{226}Ra , энергия фотонов которого находятся в широком энергетическом диапазоне, а активность достаточна для измерений с приемлемой статистикой на расстоянии до 10 м.

Разработан способ вычисления эффективности регистрации ППП для произвольной точки пространства и заданной энергии излучения. На основе экспериментальных данных строили набор зависимостей

эффективности регистрации ППП для различных энергий в зависимости от расстояния до детектора и линейного угла от его оси. При проведении экспериментов калибровочный источник размещали на разных расстояниях от детектора и с шагом по линейному углу 10° от оси детектора. При расчетах учитывали поглощение гамма-квантов в воздухе. Полученные экспериментальные значения эффективности регистрации ППП являлись опорными для расчетов значений эффективности регистрации ППП в произвольной точке пространства. В случае использования условного коллиматора разработан алгоритм для коррекции значений опорных точек в зависимости от апертуры коллиматора. Разработанный алгоритм позволяет при необходимости сгенерировать 2D карту эффективности регистрации ППП для требуемого радиального расстояния от детектора.

Определено минимальное расстояние, на котором детектор можно считать точечным.

http://www.canberra.com/products/insitu_systems/isocs.asp (ссылка действительна на 10.08.2014).

www.ortec-online.com/download/ISOTOPIC.pdf (ссылка действительна на 10.08.2014).

http://www.lsrn.ru/products/virtual_lab/lsrn_effmaker/ (ссылка действительна на 10.08.2014).

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕНОСНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ

Даниленко В.Н., Ковальский Е.А., Кувыкин И.В.,
Соловьева С.Л., Скубо Ю.В., Суворов Д.А., Демина Н.С.,
Пономаренко Р.А., Федоровский С.Ю.
*ООО «ЛСРМ», Зеленоград, Россия,
danilenko@lsrm.ru*

Представлены новые разработки спектрометрического ПО для переносных и стационарных систем:

- Новая версия семейства многофункциональных спектрометрических программ SpectraLine-SpectraLine 1.5 – Рассмотрены отличия от предыдущих версий.
- Программный комплекс Diogen III, предназначенный для контроля радиоактивных отходов с помощью паспортизаторов с любым числом измерительных каналов, в частности, системы паспортизации бочек типа СКГ-02-02 и системы паспортизации невозвратных защитных контейнеров (НЗК) типа СКГ-02-03.
- GIS LSRM – геоинформационная система радиационного мониторинга территорий позволяющая определять радионуклидный состав исследуемых объектов и производить привязку результатов к картографическим данным.
- Спектрометрическое программное обеспечение для переносных систем, работающее на планшетных компьютерах как под управлением ОС Windows 8, так и под управлением ОС Android.

МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Данилкин М.^{1,2}, Керикмяэ М.², Луст А.², Применко А.³, Славин Г.⁴

¹Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия,

²Институт химии Тартуского университета, Тарту, Эстония,

³НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия,

⁴АО Аспер Биотех, Эстония,

mihhail.danilkin@ya.ru

Термолюминесцентные детекторы (ТЛД) ионизирующих излучений измеряют интегральную дозу радиации и применяются для решения различных дозиметрических задач – от мониторинга доз облучения персонала и до контроля уровней радиации в окружающей среде. Каждая задача требует своих материалов: так, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ с его идеальной тканеэквивалентностью подходит для персональных дозиметров, $\text{SrSO}_4\text{:Eu}$ с его высокой чувствительностью нужен для дозиметрии окружающей среды, а $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ с чрезвычайно широким диапазоном измеряемых доз пригоден для дозиметрии при технологической обработке материалов и при радиационных авариях.

Общее свойство этих материалов – довольно широкий (хотя и у каждого свой) диапазон линейности по дозе. Линейность подразумевает квази-внутрицентровые процессы запасаания и особенно освобождения энергии, когда вклад побочных рекомбинационных процессов пренебрежимо мал. Исследования кинетики затухания люминесценции этих материалов при различных температурах показали, что затухание биэкспоненциально, притом времена затухания τ_1 и τ_2 систематически уменьшаются с ростом температуры. Такое поведение хорошо описывается системой двух линейных однородных дифференциальных уравнений, решением которых и будет наблюдаемая в эксперименте сумма двух экспонент. Зависимость τ_1 и τ_2 от температуры можно выразить через вероятности освобождения $W_{T0} \cdot \exp(-E_T/KT)$ и рекомбинации $W_{R0} \cdot \exp(-E_R/KT)$:

$$\ln(1/(\tau_1 \cdot \tau_2)) = \ln(W_{R0} \cdot W_{T0}) - (E_R + E_T)/KT, \quad (1)$$

$$1/\tau_1 + 1/\tau_2 = W_C + W_{R0} \cdot \exp(-E_R/KT) + W_{T0} \cdot \exp(-E_T/KT). \quad (2)$$

Температурная зависимость вероятности рекомбинации связана с транспортным барьером, природа которого в различных материалах

может быть несколько разной. Например, это структурированная валентная зона, разделённая на подзоны, что требует дополнительной энергии активации переноса дырки, а также дополнительные кулоновские барьеры из-за неполного экранирования электроном положительного заряда примеси, как у $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ [1], или же энергии активации транспорта H -центров в $\text{CaF}_2\text{:Mn}$. Несмотря на большие различия в механизмах термолюминесценции, предлагаемая модель очень хорошо описывает экспериментальные результаты и позволяет с высокой точностью симулировать пик термолюминесценции. Симуляция пика и его подгонка методом Монте-Карло позволяет уточнить параметры кинетики, полученные из измерений кривых затухания по уравнениям (1) и (2). Применимость предложенной кинетической модели продемонстрирована на примере двух различных материалов, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ и $\text{CaF}_2\text{:Mn}$. Модель позволяет оценить, насколько пригодна оптическая стимуляция вместо термической для считывания детекторов: большая энергия активации рекомбинации делает оптическую стимуляцию неэффективной при комнатной температуре, требуется термо-оптическое считывание. Эта информация важна для построения новых компактных портативных дозиметрических систем.

1. Ratas, A., Danilkin, M., Kerikmäe, M., Lust, A., Mändar, H., Seeman, V., Slavin, G. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ for dosimetry applications: traps and mechanisms. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2012, **61**, 4, 279–295.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО: ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ

Дворников О.В.¹, Дятлов В.Л.¹, Чеховский В.А.²

¹ОАО “МНИПИ” Минск, Беларусь,

²Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,
Минск, Беларусь,
vichek@hep.by

На базе специализированной аналоговой микросхемы *MN1XA030*, изготовленной на базовом специализированном кристалле [1] и малошумящих полевых транзисторах с *p-n*-переходом (*n*-ПТП), разработан и испытан электронный модуль обработки сигналов лавинных фотодиодов (ЛФД).

Электронный модуль разработан в виде изменяемой и наращиваемой конструкции, так называемой «этажерки», позволяющей использовать печатные платы унифицированных размеров с разными каналами обработки сигналов датчиков, разными дискретными *n*-ПТП, а также подключать термоэлектрический охладитель на элементах Пельтье и различные типы фотоприемников: ЛФД и кремниевые фотоэлектронные умножители (Рис. 1).

Основные функциональные узлы [2]: зарядочувствительный усилитель с использованием выносного головного транзистора, *RC-CR*⁴ шумоподавляющий фильтр, выходной повторитель, цепи калибровки/тестирования, схема задания режима ЛФД и пр.

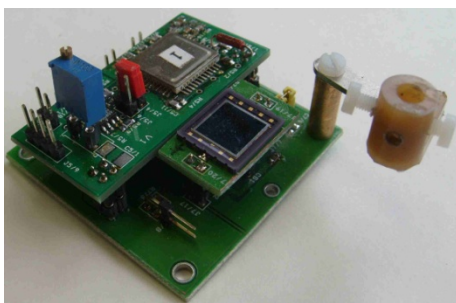


Рис.1. Фотография оптико-электронного устройства с кронштейном крепления волоконно-оптического световода и фотодиодом S5107 (Hamamatsu)

Модуль позволяет преобразовать токовые сигналы ЛФД в выходное напряжение и характеризуется предельно малым уровнем шумов, определяемым внешним полевым транзистором:

- эквивалентный шумовой заряд при нулевой емкости источника сигнала не превышает 230 электронов для головного транзистора типа *KS152* и 300 электронов для *KS363V* при времени «пика» 2,2 мкс;
- увеличение эквивалентного шумового заряда при увеличении емкости источника сигнала на 1 пФ – около 3,8 электронов для головного транзистора типа *KS152* и 1,9 электронов для *KS363* при времени пика 2,2 мкс.

1. О. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов. Универсальная аналоговая микросхема для датчиков. Современная электроника. 2011. № 3. С. 56–65.
2. И.И. Абрамов, О.В. Дворников. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем Минск: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ЛИНЕЙНОСТИ ДЕТЕКТОРА ГАММА-КАМЕРЫ

Демин А.В.¹, Кофман О.И.², Сенягин Ю.Ю.²

¹*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,*

²*Харьковский национальный университет им. Каразина, Харьков, Украина,
demin@isma.kharkov.ua, okofman@ukr.net, seniagin2012@gmail.com*

Для исправления систематических ошибок алгоритма реконструкции координат сцинтилляции в детекторе гамма-камеры используется процедура калибровки и последующей коррекции линейности. Для этого используется линейный фантом, который представляет собой двумерную квадратную регулярную решетку отверстий в свинцовой пластине. После длительной экспозиции с источником радиации мы получим на детекторе изображение фантома. Из-за систематических ошибок, решетка изображения перестает быть регулярной. А случайные ошибки приводят к тому, что почти точечные отверстия расплываются в колоколообразные распределения. Далее стоит задача распознавания центров отверстий и установления соответствия между каждым из распознанных центров и исходными отверстиями фантома. И на основании этих соответствий рассчитываются коэффициенты коррекции линейности для данного детектора.

Ранее задача нахождения центров решалась методом вычисления локальных максимумов распределения. Однако этот метод либо пропускал существующие центры, либо давал большое количество артефактов, т.е. лишних центров. В обоих случаях требовался тщательный анализ и коррекция результатов вручную. Нами был применен метод Хафа для поиска на плоскости объектов, близких к окружностям. Для поиска соответствий нерегулярной решетки изображения и регулярной решетки линейного фантома были использованы кластерные методы распознавания образов. В результате было создано программное обеспечение для оператора-настройщика, которое позволяет производить линейную калибровку детектора гамма-камеры и вычислять корректировочные коэффициенты на основании изображения линейного фантома. Полностью автоматизировать процесс не удалось, однако количество артефактов уменьшилось на порядок, что существенно упростило анализ изображения в ручном режиме.

ДЕТЕКТОРЫ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ $\text{ZnS(Ag)}/^6\text{LiF}$ И $\text{ZnS(Ag)}/\text{H}_3^{10}\text{BO}_3$

Дубцов И.Н.¹, Шпилинская О.Л.², Андриющенко Л.А.¹,
Тарасов В.А.¹, Трефилова Л.Н.¹

¹ Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,

² Институт монокристаллов НАН Украины, НАНУ, Харьков, Украина,
dubcov@isma.kharkov.ua, larisatrefilova@ukr.net

Для создания нейтронного канала регистрации в порталных радиационных мониторах значительный практический интерес представляют сцинтилляционные детекторы на основе люминофора ZnS(Ag) , находящегося в смеси с конвертором ^6LiF или $\text{H}_3^{10}\text{BO}_3$. Актуальной проблемой при разработке детекторов на основе этих систем является выбор оптимального состава смеси, размера частиц сцинтиллятора и конвертора.

В данной работе методами компьютерного моделирования оптимизированы по составу и размерам смеси частиц $\text{ZnS(Ag)}/^6\text{LiF}$ и $\text{ZnS(Ag)}/\text{H}_3^{10}\text{BO}_3$ в эпоксидной матрице.

Полученные результаты подтверждены экспериментальными исследованиями эффективности регистрации тепловых нейтронов для различных образцов однослойных светосоставов.

Показано, что при содержании конвертора менее 30 масс% в светосоставах и размере частиц ^6LiF в пределах 0,6–0,8 мкм, а частиц $\text{H}_3^{10}\text{BO}_3$ – менее 2 мкм достигается улучшение светового выхода на 10% и повышение эффективности регистрации тепловых нейтронов более чем на 20%.

На основе выбранных светосоставов изготовлены детекторы тепловых нейтронов различной конструкции.

Показано, что детекторы, состоящие из пяти слоев светосостава, разделенных 4-мя пластинами оргстекла размерами $40 \times 25 \times 3$ мм³, выполняющих функцию световода и замедлителя нейтронов имеют эффективность регистрации тепловых нейтронов около 75%. Отличительной особенностью данной конструкции детектора является простота и надежность в эксплуатации, что делает их перспективными для замены дефицитных недолговечных He-3 нейтронных детекторов.

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ДИАПАЗОНОВ СПЕКТРА

Дудчик Ю.И.

*НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь,
dudchik@bsu.by*

Многоэлементная преломляющая линза для рентгеновских лучей является новым элементом рентгеновской оптики. Линза позволяет фокусировать рентгеновские лучи с энергией фотонов от 5 кэВ до 30 кэВ в пятна микронных и субмикронных размеров, а также получать изображения объектов в рентгеновских лучах с субмикронным разрешением.

Поскольку действительная часть показателя преломления $1-\delta$ в рентгеновском диапазоне спектра меньше единицы, то фокусирующая линза для рентгеновских лучей является двояковогнутой. Величина δ мала и, например, для фотонов с энергией 10 кэВ в кремнии равна $4,5 \cdot 10^{-6}$. Поэтому фокусное расстояние одной линзы велико и составляет несколько метров. Для того, чтобы уменьшить фокусное расстояние линзы в N раз (или увеличить ее оптическую силу в N раз) целесообразно использовать вместо одной линзы N соосно расположенных линз.

Нами разработаны многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, выполненные в виде стеклянного капилляра, заполненного двояковогнутыми эпоксидными микролинзами с радиусом кривизны, равным радиусу канала капилляра [1]. Разработанные рентгеновские линзы прошли тестирование на синхротронах в США, Японии, Германии, Франции, Германии, Китая, России, где была показана их способность фокусировать рентгеновские лучи с энергией фотонов 7–20 кэВ в пятно микронных размеров [2]. Например, линза, содержащая 349 эпоксидных микролинз с радиусом кривизны 100 мкм каждая, фокусирует рентгеновские лучи с энергией 18 кэВ в пятно размером 1,5 мкм.

Однако поскольку показатель преломления рентгеновских лучей уменьшается с ростом энергии фотонов E_γ как $1/(E_\gamma)^2$, то эффективность преломляющей линзы ограничена областью энергии фотонов около 70 кэВ. В качестве линзы для гамма-излучения нами предлагается многоэлементная система, содержащей заданное число N расположенных соосно микролинз с радиусом кривизны поверхности R ,

при этом линзы выполнены двояковыпуклыми из материала с большим атомным номером.

Основанием для выбора указанной конструкции линзы для гамма-излучения являются недавно полученные экспериментальные данные, которые опубликованы в [3], о том, что при энергии гамма-излучения больше чем 0,7 МэВ действительная часть показателя преломления в кремнии становится больше единицы.

Проведенные нами расчеты показали, что фокусное расстояние системы, содержащей 10 золотых двояковыпуклых микролинз с радиусом кривизны поверхности 100 мкм, составляет 0,17 м для фотонов с энергией 1 МэВ. Ожидается, что предложенная многоэлементная преломляющая линза для гамма-излучения позволит фокусировать гамма-излучение с энергией фотонов около 1 МэВ в субмикронные пятна.

1. Yury Dudchik. Design and Application of X-Ray Lens in the Form of Glass Capillary Filled by a Set of Concave Epoxy Microlenses. Optical Fiber Communications and Devices. Edited by: Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun and Hamzah Arof (Ed.), ISBN: 978-953-307-954-7, Publisher:InTech, February 2012. P.77–94.
2. Dudchik, Yu. et al. Using of a microcapillary refractive X-ray lens for focusing and imaging. Spectrochimica Acta. 2007. V. B62. P. 598–602.
3. Hab, D. et al. The Refractive Index of Silicon at Ray. Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 184802 [4 pages].

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К УЛУЧШЕНИЮ СВОЙСТВ ПЛАСТМАССОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

Жмурин П.Н.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
zhmurin@isma.kharkov.ua*

Пластмассовые сцинтилляторы (ПС) достаточно широко и в течение продолжительного времени используются для регистрации частиц высокой энергии. Основные параметры пластмассового сцинтиллятора связаны со световыходом на уровне 10000 фотонов/МэВ и фронтом нарастания – 0.9 нс. Как и у всех органических сцинтилляторов световыход ПС резко падает с увеличением массы регистрируемой частицы. Так при регистрации альфа частиц световыход ПС уменьшается почти в 20 раз по сравнению со световыходом при регистрации электронов. Но в отличие от всех других органических сцинтилляторов в сцинтилляционной вспышке ПС практически полностью отсутствует замедленная компонента, без которой невозможно использовать ПС для распознавания вида регистрируемых частиц по форме импульса. На протяжении длительного периода времени предпринимались попытки, направленные на поиски путей модификации свойств ПС, но только в последнее время стало ясно, за счет каких свойств возможно улучшение сцинтилляционных характеристик ПС.

Известно, что уменьшение световыхода с увеличением массы регистрируемой частицы связано с невозможностью «собирать» традиционными активаторами энергию триплетного возбуждения полимерной основы ПС. Использование в качестве активаторов различных металлоорганических комплексов тяжелых атомов позволяет решить эту проблему. Так активация ПС на основе полистирола комплексами бензоилметана европия позволила увеличить световыход почти в 20 раз. Активируя ПС различными центрами активации, способными «собирать» энергию возбуждения с триплетных и синглетных центров возбуждения, удалось придать ПС свойства нейтронного разделения по форме сцинтилляционного импульса.

Но лучших результатов по дискриминации частиц по форме импульса удалось достичь на основе явления триплет-триплетной аннигиляции. Такие эффекты наблюдаются, когда полимерную основу ПС активируют до уровня, когда возможны обменные эффекты между молекулами активатора. Как правило, это уровень десятков весовых

процентов. Так вводя 30 вес.% молекул РРО в полистирольную основу ПС, удалось достичь удовлетворительных параметров разделения нейтронного и гамма излучения.

Общеизвестно, что сцинтилляционные характеристики любого сцинтиллятора во многом связаны с условиями аннигиляции электрон-дырочных пар, образуемых в среде при пролете высоко энергетической частицы. Так фронт нарастания сцинтилляционной вспышки непосредственно связан со временем «рассасывания» зарядов. И действительно, изменяя характеристики подвижности зарядов полимерной основы ПС путем ввода различных добавок, удается значительно уменьшить фронт нарастания сцинтилляционной вспышки ПС с сохранением его световыхода. Так активация полистирола молекулами трифениламина, что приводит к изменению подвижности электронов в такой среде, сокращает фронт нарастания с 0.9 нс до 0.5 нс с сохранением общего световыхода.

Таким образом в последнее время наметился путь к существенному улучшению сцинтилляционных характеристик пластмассового сцинтиллятора.

ПЛАСТМАССОВЫЙ СЦИНТИЛЛЯТОР НА ОСНОВЕ ПОЛИСТИРОЛА ДЛЯ n/γ -РАЗДЕЛЕНИЯ

Жмурин П.Н., Лебедев В.Н., Тицкая В.Д., Ададунов А.Ф.,
Елисеев Д.А., Переймак В.Н.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
adadurov@isma.kharkov.ua*

Предложен пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола для n/γ -разделения по форме импульса с улучшенными механическими свойствами, высокой долговременной стабильностью и высоким значением параметра n/γ -разделения FOM (не менее 1,27 в широком энергетическом диапазоне).

Синтезирован ряд новых активаторов – алкилпроизводных дифенилоксадиазола (PPD), исследована их растворимость в полистирольной полимерной матрице. Установлено, что два активатора из исследованного ряда 2-фенил-5-(4-трет-бутилфенил)-1,3,4-оксадиазол (tert-BuPPD) и 2,5-ди-(3-метилфенил)-1,3,4 оксадиазол (m-DMePPD) обладают растворимостью в полистироле более 40%. На основе этих активаторов получены ПС для n/γ -разделения, обладающие высокой микротвердостью.

Кривые распределения сигналов позволили рассчитать коэффициент n/γ -разделения – FOM, который составил соответственно 1,49 и 1,81. Для уверенного разделения сигналов необходимо выполнение условия $FOM > 1,27$, т. е. полученные ПС могут быть использованы для создания детекторов быстрых нейтронов на фоне гамма-излучения.

ГАММА-СПЕКТРОМЕТР МКС-АТ6104DM ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ И ПРИДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Жуковский А.И., Чирикало В.А., Крук С.В.,

Гузов В.Д., Кожемякин В.А.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
Минск, Беларусь, rimlianin@gmail.com*

Задачи в виде постоянного или периодического мониторинга водоемов, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате штатных выбросов АЭС или в результате возникновения внештатных ситуаций на предприятиях топливного ядерного цикла, приводят к необходимости разработки средств измерений с современным математическим и программным обеспечением, позволяющих оценить уровень радиоактивных загрязнений с заданной точностью. Для радиационного контроля водной среды и донных отложений методом *in situ* нами разработан и изготовлен многофункциональный гамма-спектрометр МКС-АТ6104DM.

Спектрометр представляет собой многофункциональный прибор, состоящий из размещаемого в герметичном контейнере спектрометрического сцинтилляционного блока детектирования с кристаллом NaI(Tl) диаметром и высотой 63 мм, вьюшки с глубоководным кабелем, и планшетного компьютера для обработки и отображения информации. Контейнер устойчив к статическому гидравлическому давлению до 1,5 МПа, что позволяет проводить измерения на глубинах до 500 м. Устройство детектирования позволяет измерять энергетическое распределение гамма-излучения с энергией от 70 до 3000 кэВ.

Реализованная система определения положения устройства детектирования в пространстве позволяет использовать спектрометр в автоматическом режиме (без участия оператора) для сканирования водной среды или донных илистых отложений. Результаты измерения заданной величины с трехмерными географическими координатами могут быть оперативно представлены в виде карт-схем распределения с необходимой дискретностью и точностью.

Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментально в префектуре Фукусима (Япония) на оросительных прудах, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ И ИЗМЕРЕНИЙ IN SITU

Жуковский А.И.¹, Кутень С.А.², Хрушинский А.А.²,
Ничипорчук А.О.¹, Гузов В.Д.¹, Кожемякин В.А.¹
¹Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
Минск, Беларусь,
²Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,
rimlianiin@gmail.com

Решение задач радиационного мониторинга почв, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварийных ситуаций на предприятиях топливного ядерного цикла, приводит к необходимости разработки и практической реализации методов, позволяющих оценить уровень радиоактивных загрязнений с заданной точностью. Основная задача математического моделирования заключалась в создании математической модели почвы и устройства детектирования спектрометра с целью получения в заданных геометриях измерения функций отклика в виде аппаратурных спектров.

Для численного моделирования методом Монте-Карло использовалось программное обеспечение SNEGMONT (Scattering of Nuclons, Electrons, Gamma by MONTe-Carlo). Расчет аппаратурных спектров осуществлялся для техногенных радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs для различных глубин залегания.

Разработанные математические модели спектрометра и почвы позволили определить функции отклика детектора на излучение контролируемых радионуклидов в заданных геометриях измерения, а также получить функциональные зависимости эффективного радиуса слоя почвы от глубины залегания радионуклидов. Определена аналитическая связь отклика детектора и радиационных характеристик почв с равномерным распределением радионуклида для различных комбинаций глубины залегания и протяженности радиоактивного слоя. Полученные результаты позволили оптимизировать метрологические характеристики гамма-спектрометра МКС-АТ6101ДР в зависимости от типа почв и комбинаций контролируемых радионуклидов.

Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментально в префектуре Фукусима на рисовых и фруктовых полях, подвергшихся радиоактивному загрязнению после аварии на АЭС.

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Иванов А.И.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
alexeyivan@gmail.com*

Обнаружение нелегального трафика радиоактивных веществ является одной из актуальных задач национальной безопасности. Основным инструментом, используемым для данной задачи, в большинстве случаев являются радиационные портальные мониторы (РПМ). Широкое распространение они получили после событий 9/11. Более декады активного использования выявили основные недостатки РПМ – достаточно большой процент ложных тревог, неспособность выявления экранированных ядерных материалов и препятствование трафику транспортных средств. В настоящее время научное сообщество находится в поиске альтернативных технологий, способных свести к минимуму обозначенные недостатки. К таким технологиям следует отнести спектрометрические порталы, детектирование продуктов индуцированного деления, системы визуализации ионизирующего излучения, а также системы, основанные на ядерной резонансной флюоресценции. При этом, как правило, упор делается на комбинированное использование данных технологий. В большинстве случаев слияние данных от различных детектирующих систем позволяет значительно повысить чувствительность, понизить вероятность ошибки обнаружения и уменьшить время, требуемое для сканирования объекта.

Работа посвящена моделированию систем, использующих комбинированные методы обнаружения. Рассмотрены системы, позволяющие совмещать режим РПМ с детектированием продуктов индуцированного деления, а также с мюонной томографией либо рентгеновским сканированием. Основная цель работы – оценка выигрыша в чувствительности при слиянии данных и оптимизация параметров детекторов для одновременного использования в нескольких технологиях детектирования специальных ядерных материалов. Предложены варианты пластиковых детекторов, обладающих позиционной чувствительностью, необходимой для мюонной томографии, а также светосбором, достаточным для применения в качестве детектора РПМ.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ В СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ АЭС, ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА

Казимиров А.С., Казимирова Г.Ф., Мартынюк Л.Б.,
Иевлев С.М., Черный Е.В.
*ООО Научно-производственное предприятие «АТОМКОМПЛЕКСПРИБОР»,
Киев, Украина, akp@akp.kiev.ua*

На примерах из опыта эксплуатации спектрометрических систем собственной разработки оценивается достаточность контроля барьеров безопасности АЭС и делаются выводы о возможных путях улучшения состояния дел в области аппаратного обеспечения радиационного контроля. Представлены основные характеристики гамма, бета-спектрометров, спектрометров излучения человека, спектрометрических комплексов для АЭС.

Для изготовления большинства приборов преимущественно используются сцинтилляционные детекторы β - и γ -излучения, среди которых:

- Лабораторные спектрометры энергии β - и γ -излучения.
- Спектрометры излучения человека серии «СИЧ-АКП».
- Передвижные γ -спектрометрические установки для:
 - определения активности и радиоизотопного состава твердых радиоактивных отходов (ТРО) первой и второй групп без проведения пробоотбора;
 - поиска радиоактивных источников и определения радиоактивного загрязнения территорий в зонах аварий (полевая спектрометрия);
 - определения состава радионуклидов в сухих и заполненных водой скважинах.
- Устройство детектирования типа УДЖГ для измерения объемной активности γ -излучающих нуклидов в жидкости технологических контуров АЭС.
- Программно-технический комплекс определения протечек в парогенераторах по активности ^{16}N в остром паре «Азот-16-ПГ».
- Спектрометрический комплекс контроля активности теплоносителя первого контура СТПК-01 на основе полупроводникового детектора.

Рассмотрены возможности и перспективы использования приборов сцинтилляционной спектрометрии для решения широкого круга вопросов радиационного контроля техногенных и естественных радионуклидов в окружающей среде. Также описаны разработки для систем радиационного контроля (СРК) АЭС.

ДЕТЕКТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ СТМ «АЛМАЗОТ»

Казючиц Н.М., Казючиц В.Н., Макаренко Л.Ф.,
Наумчик Е.В., Русецкий М.С.

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
kazuchits@bsu.by*

Алмаз характеризуется прочными связями атомов в кристаллической решетке, которые обеспечивают его высокую химическую и радиационную стойкость. Тканезквивалентность алмаза позволяет непосредственно измерять дозу радиации без соответствующей коррекции на природу материала детектора. Высокие значения подвижности и скорости насыщения носителей заряда наряду с низким значением их времени жизни определяют высокое быстродействие электронных приборов на основе алмаза. Большая ширина запрещенной зоны алмаза (5,5 эВ) обеспечивает малые токи утечки и низкий уровень шума приборов. Совокупность этих характеристик [1] делает алмаз привлекательным для изготовления детекторов ультрафиолетового (УФ) и ионизирующих излучений.

Цель работы – оценка пригодности выращенных в Республике Беларусь синтетических алмазов СТМ «Алмазот» [2] для создания дозиметрических, спектрометрических и импульсных детекторов УФ и ионизирующих излучений.

Нами были изготовлены детекторные структуры на основе пластин СТМ «Алмазот» толщиной около 300 мкм. С использованием имплантации ионов бора и последующего активационного отжига в вакууме на обеих поверхностях пластин создавались контакты: сплошные для регистрации ионизирующих излучений и с окнами – для регистрации УФ излучений.

В работе приведены результаты исследований распределения примесей и дефектов в синтетических алмазах СТМ «Алмазот» [3, 4], установлена корреляция между примесно-дефектным составом и основными эксплуатационными характеристиками детекторов. Показано, что детекторные структуры дозиметров, импульсных детекторов и фотоприемников УФ диапазона, изготовленные из специально отобранных СТМ «Алмазот», имеют высокие эксплуатационные характеристики, сопоставимые с характеристиками детекторов на основе природных алмазов типа IIa [5]. Отмечены некоторые проблемы при создании

спектрометрических детекторов на основе СТМ «Алмазот». На основе проведенных исследований выработаны критерии отбора синтетических алмазов СТМ «Алмазот» «детекторного качества».

1. R. J. Tapper. Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 1273–1316.
2. www.adamas.by.
3. Н.М Казючиц, А.В. Коновалова, И.И. Азарко и др. Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 2. С. 144–149.
4. E. Gaubas, T. Ceponis, A. Jasiunas, V. Kalendra, J. Pavlov, N. Kazuchits, E. Naumchik, M. Rusetsky. Diamond & Related Materials. 2014. V. 47. P. 15–26.
5. Н.М Казючиц, Л.Ф. Макаренко, Е.В. Наумчик, М.С. Русецкий, А.С. Шуленков. Труды XXIII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 8–13 июля 2013 г. М. : ФГБНУ «НИИ ПНТ», 2013. С. 446–453.

ПРЕИМУЩЕСТВА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ИЗ ОРГАНИКИ И НЕОРГАНИКИ С РЕГУЛЯРНОЙ СВЕРХСТРУКТУРОЙ ТИПА ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Классен Н.В., Кедров В.В., Шмурак С.З., Шмытько И.М.,
Покидов А.П., Васин А.А.

*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия,
Астраханский государственный университет, Астрахань, Россия,
klassen@issp.ac.ru*

Ранее нами были разработаны сцинтилляционные нанокomпозиты из органических люминофоров и неорганических наночастиц, сочетающие наносекундное быстродействие органики с высокой поглощательной способностью гамма-излучения неорганических материалов из тяжелых атомов. Световыход этих композитов – на уровне эталонного CsI(Tl) (при быстродействии в 500 раз лучше). Устранение дилеммы «либо быстродействие, либо световыход» позволяет резко улучшить временное разрешение радиационных детекторов и многократно повысить их чувствительность (например, путем регистрации в режиме счета фотонов). Но смешивание в монолитном сцинтилляторе материалов со значительно различающимися показателями преломления при их случайном распределении заметно усиливает рассеяние света. Поэтому подобные композиты хорошо работают лишь до толщин 300–500 микрон. При дальнейшем увеличении толщины, необходимом для регистрации более жестких гамма-квантов, световыход быстро падает за счет оптических неоднородностей. Существенное улучшение светосбора в композитных сцинтилляторах можно решить не ослаблением, а, наоборот, усилением неоднородностей распределения наночастиц за счет его пространственной регуляризации. Периодическое распределение диэлектрической проницаемости, усредненной на масштабе световой длины волны, создает структуру типа фотонного кристалла, в которой определенные диапазоны направлений являются запрещенными зонами для распространения света, но зато в разрешенных направлениях интенсивность излучения сцинтилляционных фотонов существенно возрастает. Расположение фотодетекторов именно в этих направлениях упрощает проблему светосбора, обеспечивая повышение световыхода и энергетического разрешения.

Создание периодических распределений оптических характеристик нанокомпозитов достигается несколькими приемами. Первый – подбор таких органических макромолекул, которые в комбинациях с наночастицами способны формировать периодические структуры путем самоорганизации. Наши эксперименты с рядом хорошо известных биополимеров – лигнином, коллагеном, хитозаном и ДНК – подтверждают такую возможность. Синтез нанокомпозитов из водных суспензий этих молекул с наночастицами оксидной природы при соблюдении определенных условий образует квазипериодические структуры микронных масштабов. Эффективными способами регулирования степени периодичности и других параметров этих структур является воздействие на суспензии в процессе синтеза периодического светового поля, образованного лазерной интерференцией, а также постоянного или низкочастотного электрического поля. Если лазерное воздействие является следствием известного явления оптического пинцета (диэлектрические наночастицы втягиваются в области повышенной интенсивности), то эффект электрического поля – результат дуальности кулоновского взаимодействия противоположно заряженных нанообъектов в водной суспензии: обычного притяжения на больших расстояниях и отталкивания – на малых. Отталкивание вызвано гидратированием наночастиц, приводящим к сильному уменьшению диэлектрической проницаемости вокруг них и соответствующей генерации отрицательных дипольных моментов на границе гидрата и свободной воды. В докладе будут приведены оценки возможностей улучшения сцинтилляционных характеристик путем создания фотонно-кристаллических композитов.

BULK SINGLE CRYSTALS ZnS:(Ag,Al) FOR ALPHA-PARTICLE SPECTROSCOPY

Kovalenko N.¹, Terzin I.S.¹, Ivanov N.P.¹,
Tarasov V.A.², Ananenkov A.²

¹*Institute for Single Crystals NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,*

²*Institute for Scintillation Materials NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,
nazar@isc.kharkov.ua*

ZnS:(Ag,Al) is known a long time as an effective scintillation material for alpha-particle detection. High light yield, high optical transparency, suitable wavelength of scintillation and nonhygroscopicity keep this material attractive for alpha-particle registration [1]. Low sensitivity to gamma- and beta-rays allows to build selective detectors on the base of this material. But widely used one is a polycrystalline ZnS-powder, usually mixed with a compound due to possibility to prepare large square plates. Very low energy resolution, caused by high scattering of light allows to use these detectors for counting mode only. Difficulties of obtaining large size single crystals are caused by high melting temperature and high activity of sulfur at high temperature.

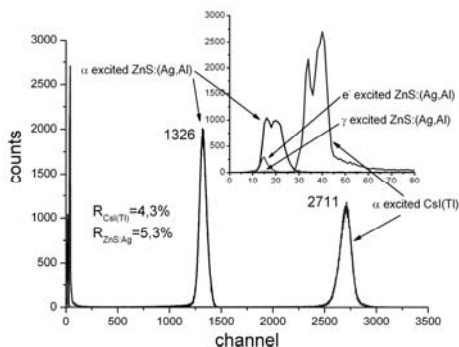


Fig.1. Amplitude spectra of ZnS:(Ag,Al) and CsI(Tl), obtained under excitation of Pu^{239} α -particles source

In this work we present ZnS:(Ag,Al) single crystals as a scintillator with high energy resolution for alpha-particles detection. The ZnS ingots with a diameter 30 mm and length 60 mm were grown by Bridgeman method under high excessive argon's pressure for keeping the stoichiometry of initial com-

pound. Doping was performed during growth process. Obtained crystals are clear, light green colored and highly transparent in visible and IR optical regions. Spectrometric measurements show 5.3% energy resolution for alpha-particles with energy 5.15 MeV of Pu²³⁹-source (Fig. 1). Sensitivity to electrons was measured for electrons of internal conversion of Cs¹³⁷. In view of light yield and particles energy the α/β -ratio is about 10 instead of 0.55 for CsI(Tl).

Finally, we demonstrate possibility to produce single crystalline scintillating detectors based on ZnS:(Ag,Al) for detection and spectrometry of alpha-particles. Our technology allows to prepare detectors up to 30 mm diameter, 1 mm thickness and more.

1. Study on pulse height discrimination of alpha-ray using ZnS (Ag) scintillation detector – adaptability to contamination monitoring equipments. Izaki K., Ino K., Mizuniwa H. Book, 2009, published by Japan Atomic Energy Agency.
2. Y.T.Viday, B.V.Grinyov, L.B.Zagarij, N.D.Zverev, V.V. Chernikov, V.A. Tarasov, A.M.Kudin. Research and Development of Ceramic Scintillators Applied to Alpha-particle Detection. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, 1995., 1995 IEEE, vol.2, p. 762–763.

РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО КОМПЛЕКТОВАНИЮ АСКРО БЕЛОРУССКОЙ АЭС ОБОРУДОВАНИЕМ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Кожемякин В.А.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
Минск, Беларусь, rimlianin@gmail.com*

В докладе рассматривается предложенный комплекс современных технических решений по реализации измерительных каналов на основе сцинтилляционных детекторов в АСКРО строящейся Белорусской АЭС.

Комплекс охватывает состав стационарных измерительных постов, передвижных радиометрических лабораторий, радиохимической и радиометрической лаборатории АСКРО АЭС.

Аппаратура на основе сцинтилляторов представлена стационарными, подвижными и носимыми измерительными средствами (дозиметрами, радиометрами, спектрометрами), отвечающими современному научно-инженерному уровню, перспективными в развитии и доукомплектованные в процессе их эксплуатации, обеспечиваемыми надежной сервисной поддержкой, а также импортозамещающими по большинству позиций соответствующих спецификаций.

RADIATION DAMAGE OF SCINTILLATION DETECTORS AT HIGH LUMINOSITY LHC EXPERIMENTS

Korjik M.

*Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,
Minsk, Belarus, Mikhail.Korjik@cern.ch*

Change in the optical transmission due to the formation of color centers under irradiation with high energy protons is only a portion of the effects related to the damage and breaking the regularity of the material structure under ionizing radiation. An interaction of the detector crystals and energetic charged particles at a large fluence, corresponding to collider experiments, gives rise to a range of effects, which are phosphorescence, radio-luminescence due to induced radionuclides in crystals themselves and surrounding construction materials. When combined, these effects can lead to unacceptable degradation of detectors, manifested in the decrease of the statistic term and the increase of the part of the constant term in the energy resolution, the appearance of nonlinearity in the detector response and a noticeable deterioration in the time resolution of both separate detector units and the detector as a whole. The combination of these effects actually forms the limiting value of the absorbed radiation dose for the operation of the crystalline detector material in the high dose rate ionizing radiation environment. This limiting value is obviously a specific parameter for every material. Moreover, operational conditions at the HL LHC put stringent requirements on detector materials in terms of radiation hardness in order to ensure a reliable data taking over its lifetime. As consequence detailed damage effects studies were launched in order to define crystalline species with acceptable combination of damage effects, particularly under hadron irradiation. Recently we have performed a systematic study of the damage effects in heavy crystalline materials which are used and considered for application in high energy experiments [1–4]. It was shown that lighter materials, where Lu is substituted by Y, are subjected to smaller damage under hadron irradiation. Here we present results of the damage effects study in inorganic scintillation materials.

1. E. Auffray, A. Barysevich, A. Fedorov, M. Korjik, et al. Radiation damage of LSO crystals under γ - and 24 GeV protons irradiation, NIM A 721 (2013) 76–82.
2. Auffray, E., Korjik, M., Singovski, A. Experimental Study of Lead Tungstate Scintillator Proton-Induced Damage and Recovery, IEEE Trans. Nucl. Sci., 59 (2012) 2219–2223.
3. Auffray E., Fedorov A., Korjik M. et al. Radiation Damage of Oxy-Orthosilicate Scintillation Crystals Under Gamma and High Energy Proton Irradiation, IEEE Trans. Nucle. Sci. 61(2014)495–500.
4. Dormenev, V., Korjik, M. et al. Comparison of Radiation Damage Effects in PWO Crystals Under 150 MeV and 24 GeV High Fluence Proton Irradiation, IEEE Trans. Nucl. Sci. 61 (2014) 501–506.

ДЕТЕКТОРЫ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА CdZnTe

Космына М.Б.¹, Кутний В.Е.², Рыбка А.В.², Терзин И.С.¹,
Коваленко Н.О.¹, Сулима С.В.¹

¹Институт монокристаллов НАНУ Харьков, Украина,

²ИНЦ «ХФТИ», Харьков, Украина,

kosmyna@isc.kharkov.ua

Кристаллы твердого раствора CdZnTe являются одним из самых эффективных материалов для прямого преобразования энергии гамма квантов в электрический сигнал [1, 2]. Выращивание кристаллов с высоким энергетическим разрешением сопряжено с технологическими трудностями получения материала с высоким удельным сопротивлением, высоким структурным совершенством, малой концентрацией (отсутствии) включений другой фазы. В данной работе представлены результаты исследований по установлению связи физических характеристик кристаллов CdZnTe с условиями выращивания и создания детекторов на их основе.

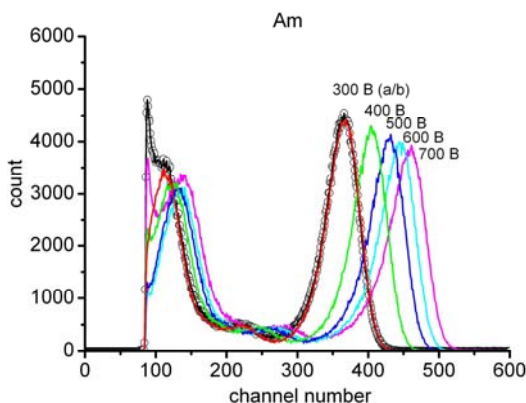


Рис.1. Амплитудные спектры америция, полученные при различных напряжениях смещения на монокристаллическом детекторе CdZnTe 6×6×5 мм

Кристаллы твердого раствора были получены по методу Бриджмена в различных тепловых условиях. Технологический цикл включал в себя предварительный синтез шихты из компонентов Cd, Zn, Te чистоты 6N

(5Nplus, Canada) и последующее выращивание из расплава в графитовом тигле чистоты 5N под избыточным давлением аргона (6N) при давлении ~30 атм. Применялись тигли как с внутренним покрытием из р-BN (Phostec, Словакия), так и без покрытий. Легирующие примеси индия и железа вводились на этапе синтеза шихты. Градиент температуры в зоне кристаллизации составлял 15–30°C/см при скорости перемещения тигля 0,6–1 мм/час. Исследованы распределение химического состава, структурные и электрические свойства выращенных кристаллов. Из выращенных кристаллов изготовлены детекторы с планарным расположением золотых электродов и исследованы их спектрометрические свойства. На Рис.1 приведена серия типичных амплитудных спектров при различных напряжениях смещения на детекторе. Такие детекторы могут применяться при создании компактных переносных радиационных спектрометров.

Работа выполнена при поддержке УНТЦ (проект P406).

1. Stefano Del Sordo, Leonardo Abbene, Ezio Caroli, Anna Maria Mancini, Andrea Zappettini, Pietro Ubertini. Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material. *Materials Science and Engineering*, 32 (2001) 103–189.
2. Bolotnikov A.E., Camarda G.C., Carini G.A., Fiederle M., Li L., McGregor D.S., McNeil W., Wright G.W., James R.B. Performance characteristics of Frisch-ring CdZnTe detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2006;53: 607–614.

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «ГНЦ НИИАР» И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

Кремер А.В., Кушнир Ю.А., Леоненко А.А., Леоненко Д.А.,
Лещенко Ю.И., Малков А.П., Романовский В.С., Теллин А.И.
*ОАО "Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт
атомных реакторов", Димитровград, Россия,
niiar@niiar.ru, malkov@niiar.ru*

ОАО «ГНЦ НИИАР» является крупнейшим в России научно-исследовательским экспериментальным комплексом гражданской атомной энергетики. Одно из направлений деятельности института – работа в пяти исследовательских ядерных реакторах различных радионуклидов; производство на основе этих радионуклидов высокотехнологичных источников ионизирующих излучений (ИИИ) для науки, промышленности и медицины; разработка технологий и систем измерений с использованием ИИИ.

В докладе представлен обзор ИИИ производства ОАО «ГНЦ НИИАР», применяемых в целях контроля неразрушающими методами характеристик различных материалов, прежде всего ядерных, в изделиях.

Для целей учета и контроля ядерных материалов в топливе ядерных реакторов и контейнерах с сырьевыми материалами для производства этого топлива необходимы средства измерения характеристик материалов неразрушающими методами анализа (НРА). Для измерений используют, как правило, гамма-спектрометрическую аппаратуру с сцинтилляционными или полупроводниковыми детекторами.

Для настройки, калибровки и поверки измерительного оборудования необходимы ИИИ в качестве стандартных образцов (СО) требуемого класса. В ОАО «ГНЦ НИИАР» разработаны, изготовлены и аттестованы в качестве стандартных образцов для зарубежных и отечественных организаций, а также собственных нужд ИИИ, содержащие уран и плутоний различных композиций. Аттестация СО проведена от уровня рабочих образцов предприятия до государственных стандартных образцов (ГСО).

Для контроля распределения материалов в цилиндрических, плоских и кольцевых изделиях разрабатываются методики и оборудование с ис-

пользованием сцинтилляционных детекторов (NaI(Tl) и $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$), ИИИ на основе радионуклида ^{55}Fe с непрерывным рентгеновским спектром излучения в диапазоне 30–220 кэВ, и автоматизированных средств сканирования объекта и обработки регистрируемого спектра излучения.

Для настройки и калибровки порталных транспортных и пешеходных радиационных мониторов, устанавливаемых на проходах и проездах ядерно- и радиационно-опасных объектов, аэропортов, вокзалов и других сооружений разработаны и изготавливаются калибровочные источники с ураном и плутонием, а также альтернативные источники на основе ^{133}Ba и ^{244}Cm с различной интенсивностью.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В МИШЕНЯХ ДЛЯ НАРАБОТКИ ^{99}Mo НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ ГАММА-ПЛОТНОМЕТРИИ

Кремер А.В., Кушнир Ю.А., Леоненко А.А., Леоненко Д.А.,
Лещенко Ю.И., Малков А.П., Романовский В.С., Теллин А.И.
*ОАО "Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт
атомных реакторов", Димитровград, Россия,
niiar@niiar.ru, malkov@niiar.ru*

В ОАО «ГНЦ НИИАР» в 2011 г. начата наработка в медицинских целях радионуклида ^{99}Mo путем облучения в исследовательских реакторах института мишеней стержневого типа, содержащих уран. Молибден-99 является продуктом деления ^{235}U , который выделяют при радиохимической переработке облученных мишеней. Одно из требований системы контроля качества изготавливаемых мишеней – равномерное распределение урана по длине сердечника из сплава UAl_x . Для этих целей была разработана и внедрена оригинальная методика измерений (МИ) распределения урана в мишени.

Суть метода заключается в измерении коэффициента пропускания T сердечника, для которого при определенной энергии E_i справедливо выражение:

$$\ln T = -m_U \cdot \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_U - m_{Al} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{Al},$$

где $\frac{\mu}{\rho}$ – массовый коэффициент ослабления, $[\text{см}^2/\text{г}]$;

m – поверхностная плотность (толщина) элемента, $[\text{г}/\text{см}^2]$.

Особенностью МИ является то, что просвечивание производится рентгеновским излучением. По измеренному непрерывному спектру коэффициента пропускания вычисляется спектр макроскопического сечения материала и спектр локальной массы урана в просвечиваемом объеме мишени. При вычислении значений массовых коэффициентов ослабления для урана и алюминия, используемых для вычисления массы урана, используются специально разработанные контрольные образцы.

Рентгеновское излучение (РИ) в диапазоне энергий 30–220 кэВ генерирует источник на основе радионуклида ^{55}Fe . Для задания

необходимой формы пучка используется коллиматор из вольфрама или свинца.

Регистратор излучения в установке – сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI(Tl) с многоканальным анализатором спектра.

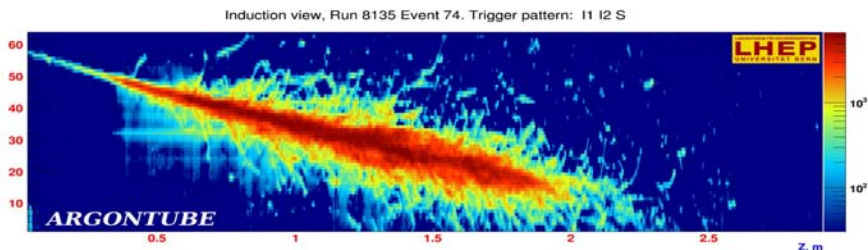
В дальнейшем для наработки ^{99}Mo предполагается использование мишеней пластинчатой формы. Для контроля распределения урана в пластинах разработана экспериментальная установка, испытания которой проходят в настоящее время. В качестве регистратора излучения используется сцинтилляционный детектор на кристалле $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, в качестве источника излучения – ИИИ на основе ^{55}Fe .

Разработанная МИ может быть модифицирована для измерения мишеней, содержащих вместо урана другие материалы, в частности, трансплутониевые элементы или нерадиоактивные тяжелые материалы. Таким образом, использование малогабаритных источников на основе ^{55}Fe позволяет создавать компактные установки для контроля распределения тяжелых элементов в исследуемых изделиях.

ARGONTUBE – ВРЕМЯ-ПРОЕКЦИОННАЯ КАМЕРА НА ЖИДКОМ АРГОНЕ С РЕКОРДНОЙ ДЛИНОЙ ДРЕЙФА

Кресло И.Е.

*Лаборатория Физики Высоких Энергий, Бернский Университет,
Igor.Kreslo@cern.ch*



Проблема создания криогенных время-проекционных детекторов на сжиженных благородных газах с длиной дрейфа порядка метров продиктована, в основном, требованиями современной нейтринной физики по увеличению активной массы детекторов высокого разрешения до уровня десятков килотонн.

В докладе представлена информация по устройству и основным параметрам время-проекционного детектора на жидком аргоне ARGONTUBE с рекордной на данный момент длиной дрейфа 4.76 метров. Показаны основные проблемы, связанные с созданием детекторов такого класса и методы их решения, в частности:

- методы достижения необходимой чистоты жидкого аргона;
- методы считывания ионизационного заряда с отношением сигнал–шум около 16 для треков от минимально-ионизирующих частиц;
- методы калибровки дрейфового поля с помощью импульсного УФ-лазера;



- методы получения необходимого напряжения на катоде порядка нескольких сотен киловольт;
- проблемы, связанные с электрической прочностью жидкого аргона, и вариант их решения.

Также представлены результаты работы детектора по регистрации космических частиц и результаты измерения продольной и поперечной диффузии электронного облака в жидком аргоне.

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИМПУЛЬСОМ ЛАЗЕРА КОЛЕБАНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ В НАНОСТРУКТУРЕ ФЕРРОМАГНЕТИК/ДИАМАГНЕТИК/ФЕРРОМАГНЕТИК

Кухарев А.В., Данилюк А.Л.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь, kuharev-sp@mail.ru, danilyuk@nano-center.org*

Посредством численного моделирования изучается поведение намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/диамагнитный металл/ферромагнетик с однодоменными ферромагнитными слоями в форме дисков при воздействии импульсов лазера пико- и наносекундной длительности. Такие структуры могут использоваться в устройствах хранения информации и в фотоприемниках для регистрации импульсного лазерного излучения. Воздействие излучения на структуру вызывает изменение магнитной кристаллографической анизотропии, уменьшение величины намагниченности насыщения, генерацию светоиндуцированного спин-поляризованного потока электронов, а в случае круговой поляризации излучения на намагниченность также действует обратный эффект Фарадея. В совокупности эти причины приводят к изменению направления намагниченности свободного ферромагнитного слоя. Моделирование намагниченности проводится в приближении макроспина с использованием уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.

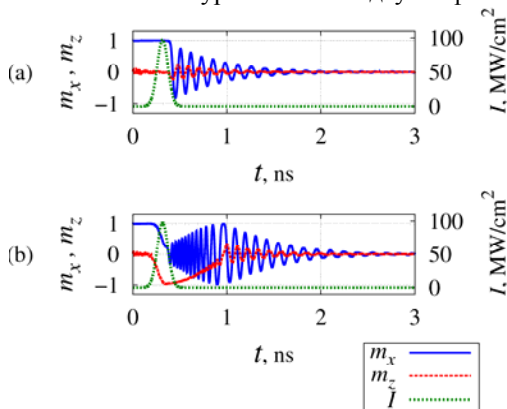


Рис. 1. Колебания намагниченности $\mathbf{m}$ в наноструктуре Co/Cu/Co при воздействии импульса лазера интенсивностью I с линейной (а) и круговой (б) поляризацией

Результаты моделирования показали (см. Рис.1), что воздействие импульсов лазера длительностью 0,1 нс и интенсивностью 100 МВт/см^2 на наноструктуру Co/Cu/Co со свободным слоем кобальта в форме диска толщиной 5 нм и диаметром 20 нм приводит к изменению направления намагниченности слоя, что сопровождается затухающими колебаниями намагниченности частотой 8–10 ГГц и продолжительностью порядка 1 нс. Основной причиной изменения направления намагниченности является уменьшение поля кристаллографической анизотропии при нагреве ферромагнетика до температуры 600 К. В случае круговой поляризации излучения на намагниченность дополнительно действует обратной магнитооптический эффект Фарадея, что приводит к увеличению частоты колебаний и времени их затухания.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ СТИЛЬБЕНА НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Лазарев И.В., Караваева Н.Л., Тарасенко О.А., Тарасов В.А.

*Институт сцинтилляционных материалов,
НТК "Институт монокристаллов" НАНУ, Харьков, Украина,
lazarev@isma.kharkov.ua*

Органические молекулярные сцинтилляционные материалы являются наилучшими детекторами короткопробежных излучений (альфа- и бета-частицы) [1]. Структурно-совершенные органические монокристаллы обладают наилучшими сцинтилляционными характеристиками, однако имеют ряд серьезных недостатков. Высокие энергетические затраты на их изготовление приводят к их высокой себестоимости. Хрупкость при механических нагрузках и резких температурных перепадах снижает их эксплуатационные характеристики. Современные методы роста ограничивают предельные размеры выращиваемых монокристаллов. Новые типы органических сцинтилляционных материалов – поликристаллы и композиционные сцинтилляторы [2] – лишены этих недостатков.

Поликристаллические сцинтилляторы изготавливают из монокристаллических зерен путем их прессования. При этом используют зерна, полученные как путем дробления ранее выращенного монокристалла, так и после очистки сырья направленной кристаллизацией и зонной плавкой. Оптимальные параметры получения поликристаллов с максимальным световым выходом еще не установлены.

В работе исследуются образцы поликристаллов на основе стильбена – одного из наиболее применяемых органических сцинтилляционных материалов [1]. Проведены исследования зависимости светового выхода поликристаллов при возбуждении альфа-частицами и конверсионными электронами от температуры горячего прессования, давления одноосного сжатия и способа подготовки материала. Измерено оптическое пропускание образцов. Исследуется разброс значений технического светового выхода дисперсных органических сцинтилляторов, полученных при оптимальных технологических параметрах.

Установлено, что оптимальной температурой прессования для зерен является 100°C, максимальные значения светового выхода имеют образцы, полученные при минимальном давлении. Наиболее эффективным

является применение в качестве материала зерен, полученных после очистки сырья методом зонной плавки.

Обнаружено, что технический световой выход ряда образцов поликристаллов стилибена превышает световой выход эталонного монокристалла. Для выяснения этого факта проведено исследование серии поликристаллов и композиционных сцинтилляторов разной высоты. У последних зерна не спекались и были разделены тонким слоем диэлектрического геля. Проведен расчет коэффициентов светособирания для разных типов возбуждения. С учетом полученных коэффициентов светособирания рассчитан абсолютный световой выход сцинтилляторов. Получено, что различие в величине абсолютного светового выхода монокристаллов и поликристаллов не превышает суммарной погрешности данных, получаемых в эксперименте и математическом моделировании процесса светособирания.

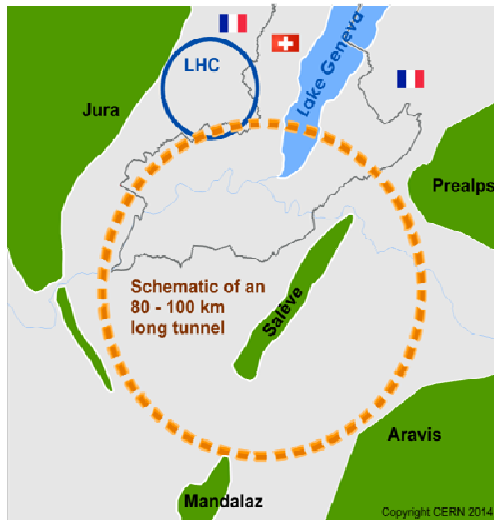
1. Галунов Н.З., Тарасенко О.А. Формирование треков ионизирующих излучений в органических конденсированных средах. Харьков: ИСМА, 2011. 480 с.
2. Budakovsky S.V., Galunov N.Z., Karavaeva N.L. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2007. Vol. 54, No.6. P.2734–2740.

FUTURE CIRCULAR COLLIDER (FCC) AND ITS CHALLENGES TO NEW DETECTOR TECHNOLOGIES

Lobko A.S.

*Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus,
lobko@inp.bsu.by*

Recently, start of the international study for the Future Circular Collider (FCC) was announced [1]. The study was launched to examine options for an energy frontier circular collider at CERN in the post-LHC era. This new collider will be based in a new 80–100 km (depending on availability of 16 T or 20 T magnet technology) circumference tunnel (see Figure) and its conceptual study comprises a 100 TeV proton (and heavy ion) collider, a high-luminosity e^+e^- (H, Z, W, and $t\bar{t}$) factory as a potential intermediate step, and an analysis of options for a hadron-lepton collider.



Expecting parameters of the future collider and corresponding physics impose many requirements to the key detector technologies. Detector dimensions, dynamical range, resolution, speed of response, radiation hardness, and many other impressive challenges resulted from energy frontier particle beams together with a collider record luminosity and beam currents will be considered in more detail.

1. Michael Benedikt, Frank Zimmermann. CERN Courier 54(3) (2014). P. 16.

GENERATION AND DETECTION OF ULTRA-FAST X-RAY PULSES

Lobko A.S.

*Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus
lobko@inp.bsu.by*

Currently the production and application of ultra-fast (sub-ps) x-ray pulses is the research area under the active development. Several various approaches utilizing ultra-fast lasers can be mentioned. These include laser-plasma sources that produce short pulses of *Bremsstrahlung* due to interaction of ionized electrons; Compton scattering of short laser pulses on relativistic electrons from external accelerator; x-rays from laser-plasma accelerated electrons passing through periodically distributed media such as single crystal lattices, multi-layer x-ray mirrors or periodic nanostructures.

Last of listed approaches may be regarded as most prospective, because laser-plasma wakefield acceleration of charged particles is considering now as the future of high energy physics technology due its potential to generate large accelerating gradients of tens Giga-electron-volts per meter (e.g. [1]). On the other hand, bright and quasi-monochromatic x-ray radiation can be produced using mechanism of parametric x-rays (PXR) and related crystal-assisted radiations by the relativistic charged particles, such as diffracted transition radiation, diffracted *Bremsstrahlung*, etc. [2].

The micron size dimensions of laser-plasma accelerating structures forms naturally ultra-short intense electron bunches resulted in ultra-short bright x-ray pulses. In other words, this research activity demands new x-ray detection and diagnostic techniques to characterize such ultrafast bursts of radiation. Transient nature of these processes and small dimensional scales present challenges to x-ray measurement and metrology in the femtosecond and sub-femtosecond scale.

Basic concepts of laser-plasma acceleration and parameters of state-of-the-art charged particle beam will be considered in the contribution. Challenges of detection and measurement for x-ray pulses and accelerated electron bunches will be described in more detail.

1. C.G.R. Geddes et al. Advanced Accelerator Concepts: 14th Workshop (2010) AIP, P. 79.
2. V.G. Baryshevsky, I.D. Feranchuk, A.P. Ulyanenko Parametric X-ray Radiation in Crystals. Theory, Experiment and Applications. Springer-Verlag, 2005.

БЛОКИ-КОМПАРАТОРЫ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ СЛАБЫХ ПОЛЕЙ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПО МОЩНОСТИ ДОЗЫ

Лукашевич Р.В., Антонов А.В., Антонов В.И., Барченко А.Г.,
Гузов В.Д., Кожемякин В.А., Фоков Г.А.
*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
Минск, Беларусь, rimlianin@gmail.com*

Создание блоков-компараторов на основе серийно выпускаемых блоков детектирования позволяет методом сличения использовать их для аттестации характеристик слабых эталонных полей рентгеновского и гамма-излучения.

Блоки-компараторы состоят из спектрометрического блока детектирования гамма-излучения БДКГ-05М со сцинтилляционным кристаллом NaI(Tl) Ø40×40 мм, спектрометрического блока детектирования рентгеновского излучения БДКР-01М с сцинтилляционным кристаллом NaI(Tl) Ø9×2 мм с бериллиевым окном Ø14,5×0,2 мм, спектрометрического блока детектирования гамма-излучения БДКГ-03М со сцинтилляционным кристаллом NaI(Tl) Ø25×16 мм и ПЭВМ со специальным прикладным ПО.

Для создания на основе блоков детектирования БДКР-01М, БДКГ-03М и БДКГ-05М блоков-компараторов использовался спектрометрический метод дозиметрии на основе преобразования измеренного аппаратурного спектра. В основе этого метода вычисления мощности доз лежит использование оператора преобразования «спектр–доза». В результате, полная мощность дозы находится с использованием функции $G(E)$ без применения восстановления спектра из измеренного амплитудного распределения фотонного излучения.

Для определения функции преобразования $G(E)$ были рассчитаны аппаратурные функции отклика блоков детектирования на излучение параллельного моноэнергетического потока гамма-квантов с энергиями от 5 до 350 кэВ для БДКР-01М и от 20 до 3000 кэВ для БДКГ-03М и БДКГ-05М, а также другие характеристики. Расчет проводился по методу Монте-Карло с помощью программного комплекса SNEGMONT (Scattering of Nuclons, Electrons, Gamma by MONTe-Carlo).

Полученные результаты использованы в качестве базовых данных для оценки дозовой энергетической зависимости чувствительности сцинтилляционных детекторов и определения операторов преобра-

зования «спектр–доза» для измерения мощности кермы в воздухе, мощности амбиентного эквивалента дозы и экспозиционной дозы.

Использование специально отобранных детекторов с высокой стабильностью измерительного тракта и низким разрешением, а также применение описанного выше подхода позволяют использовать блоки детектирования в метрологии фотонного излучения с целью поверки образцовых и рабочих средств измерений с погрешностью не более 3–6 % с использованием слабых полей (10^{-8} – 10^{-4} Зв/ч) рентгеновского и гамма-излучения в интервале энергий 5–3000 кэВ.

Планируется параллельное использование подобных блоков-компараторов как метрологического средства в УП «АТОМТЕХ», г. Минск и ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург.

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И НЕЗАКОННОГО ОБОРОТА РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мадьяров А., Блинов В., Кратько А.

*ООО «Полимастер», Минск, Беларусь,
magyarov@polimaster.us*

Государства обязаны оказывать противодействие незаконному обороту и непреднамеренному перемещению радиоактивных материалов.

В последние несколько лет сохраняется положительная динамика обнаружения случаев несанкционированного перемещения, хранения или использования источников ионизирующего излучения (ИИИ) и делящихся ядерных материалов (ДЯМ). В 2012 и 2013 годах было выявлено 167 и 146 случаев, соответственно. На этом фоне число выявленных инцидентов, связанных с криминальной деятельностью за все время сбора информации (1993–2013) демонстрирует уменьшение. Так в 2012 г. их было 20, в 2013 г. – уже 5. При этом следует отметить, что эксперты МАГАТЭ в ближайшие несколько лет ожидают рост этих показателей.

В докладе представлено оборудование и системные решения комплексного обеспечения радиационной безопасности для обнаружения и предотвращения непреднамеренного перемещения и незаконного оборота ИИИ и ДЯМ через государственные границы, а также для обеспечения радиационной безопасности на радиационно-чувствительных объектах, таких как, аэропорты, вокзалы, метрополитен, места массового скопления людей и проведения массовых мероприятий, а также для проведения радиационного контроля радиационно-опасных объектов – АЭС, хранилищ радиоактивных отходов и т.д.

Доклад знакомит с продукцией компании Полимастер для решения задач по первичному обнаружению радиационных источников, поиска и локализации, первичной и экспертной идентификации радионуклидов, обеспечению персональной радиационной безопасности.

Описывается комплект оборудования радиационного контроля для обеспечения мониторинга радиационной обстановки на границе, включая высокочувствительные стационарные портальные мониторы,

малогабаритные поисковые приборы, радиоизотопные идентификаторы, компактные дозиметры.

Представлена геоинформационная система NPNET[®], объединяющая приборы компании в единую сеть и представляющая трехуровневую концепцию радиационной безопасности. Система предназначена для обнаружения ядерных и радиоактивных материалов, мониторинга радиационной обстановки на территориях различных площадей, для обеспечения радиационной безопасности в местах массовой концентрации людей, для радиационного контроля территорий, пострадавших от техногенных катастроф.

1. База данных МАГАТЭ по инцидентам и незаконному обороту, <http://www-ns.iaea.org/security/itdb.asp>.

ELECTROMAGNETIC CALORIMETRY ON A BASE OF LEAD TUNGSTATE SCINTILLATOR AT DIFFERENT TEMPERATURES

Mechinsky V., Borisevich A., Dormenev V.,
Fedorov A., Korjik M., Kozlov D.

*Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
Minsk, Belarus,
Mikhail.Korjik@cern.ch*

Radiation damage of PWO optical transmission was described in numerous papers. Summary of the results is in [1, 2]. Measurements were performed at room temperature mostly for CMS needs, where as for the PANDA Electromagnetic Calorimeter purposes at -25°C [3].

Kinetics of the transmission irradiation damage and operation temperature recovery are very important to build a high-precision electromagnetic calorimeter. Several damage and recovery kinetics models were proposed [4–6]. They are phenomenological however, were found to be useful at certain stage of the crystal technology development. Moreover, it has been determined that PWO transmission damage is dose-rate dependent up to some saturation level at which the rate of defect filling by radiation-created carriers becomes equal to their release rate. However, temperature dependence of the radiation damage kinetics was not investigated yet.

The purpose of this study was to define a possible impact of the PWO crystals cooling to 10°C on the radiation damage of crystals optical transmission and Light Yield changes at LHC operation.

Comparison of the changes in gamma-radiation induced absorption and light yield at temperature 22 and 10°C from the lead tungstate scintillation crystals during LHC operation has been performed for the barrel region of the ECAL. Change in light yield has been simulated for 200 h of LHC operation at current LHC luminosity ($1034\text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$). Measurements have been performed to justify advisability of the ECAL Barrel operation temperature decrease from 18 to 10°C .

1. Inorganic Scintillators for Detector Systems. Physical Principles and Crystal Engineering. Series: Particle Acceleration and Detection. Lecoq, P., Annenkov, A., Gektin, A., Korzhik, M., Pedrini, C. 2006, XII, 251 p. 125 illus., Hardcover. ISBN: 3-540-27766-8. Springer, 2006.
2. Radiation hardness qualification of PbWO_4 scintillation crystals for the CMS Electromagnetic Calorimeter', The CMS Electromagnetic Calorimeter Group: P. Adzic et al., J.Inst. 5 P03010 (2010).

3. R. W. Novotny, W.M. Doering, V. I. Dormenev, S. Felsing, M. V. Korzhik, S. Luggert, P.A. Semenov, A. N. Vasiliev. Radiation Hardness and Recovery Processes of Cooled PWO-II Crystals for PANDA. Conference Program of IEEE 2008 International Conference, 19-25 October 2008, Dresden Germany. (N55-2).
4. D.A. Ma, R.Y. Zhu and H. Newman, NIM A 356 (1995) 309.
5. A. Annenkov, E. Auffray, A. Fedorov, S. Gninenko, N. Golubev, M. Korzhik, P. Lecoq, V. Ligun, A. Lobko, O. Missevitch, J.-P. Peigneux, Yu.D. Prokoskin, A. Singovski, Radiation damage kinetics in PWO crystals, CMS NOTE 1997/008, CERN, Geneva, February 21, 1997.
6. D.J.A. Cockerill, Estimates for the changes in light yield from the CMS ECAL during LHC operation. CMS IN-2010/026.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ПЛАСТМАССОВЫХ И ЖИДКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ В ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Немченко И.Б.

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия,
nemch@jinr.ru*

В настоящей обзорной работе описаны исследования, проводимые в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, по получению новых органических сцинтилляторов. В течение последних лет нами самостоятельно, а в некоторых случаях – совместно с коллегами из других научных центров получен и исследован ряд новых пластмассовых и жидких сцинтилляторов, включая элементосодержащие:

ЖС «стандартного состава» для крупномасштабного нейтринного эксперимента Daya Bay;

гадолинийсодержащий ЖС для крупномасштабного нейтринного эксперимента Daya Bay;

борсодержащие жидкие и пластмассовые сцинтилляторы;

гадолиний- и неодимсодержащие пластмассовые сцинтилляторы;

жидкие неодимсодержащие сцинтилляторы;

кадмийсодержащие жидкие и пластмассовые сцинтилляторы.

В работе описаны химические и материаловедческие аспекты исследований, представлены свойства новых материалов.

ОЧИСКА ЛИНЕЙНОГО АЛКИЛБЕНЗОЛА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНА JUNO

Немченко И.Б.^{1,2}, Камнев И.И.^{1,2}, Чередилова А.А.²
¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия,
²Университет «Дубна», Дубна, Россия,
potre_@mail.ru

В последнее время для получения жидких сцинтилляторов (ЖС) все большее внимание привлекает линейный алкилбензол (ЛАБ), являющийся смесью нескольких моноалкилированных производных бензола, содержащих от 10 до 13 атомов углерода в боковой цепи. Ароматический характер ЛАБ обеспечивает хороший световыход ЖС на его основе, а физико-химические свойства – соответствие требованиям, предъявляемым к многотонным детекторам [1]. ЛАБ – крупнотоннажный продукт нефтехимической промышленности, и поэтому недорог и доступен. Впервые использование ЛАБ в качестве основы ЖС было предложено в коллаборации SNO+ [2]. С его использованием поставлены эксперименты DAYA BAY [3] и RENO [4]. В новом крупномасштабном эксперименте JUNO предполагается создание детектора диаметром 34,5 м, содержащего 20 килотонн ЖС на основе ЛАБ. Такие размеры детектора предъявляют повышенные требования к сцинтиллятору и, естественно, его основе.

В настоящей работе описаны результаты наших исследований по повышению прозрачности линейного алкилбензола. Описано и проведено сравнение разных методик очистки ЛАБ. Полученные выводы основаны на измерениях спектров пропускания и значениях прозрачности полученных образцов.

Настоящая работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 14-02-91165 ГФЕН_а «Жидкий сцинтиллятор для крупномасштабных экспериментов в области нейтринной физики»).

1. Немченко, И.Б. и др. Жидкий сцинтиллятор на основе линейного алкилбензола. Письма в ЭЧАЯ. 2011. Т. 8. №2. С. 218–227.
2. Chen M.C. The SNO+ Experiment. 34th International Conference on High Energy Physics, Philadelphia, 2008.
3. An, F. P. et al. Side-by-side comparison of Daya Bay antineutrino. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2012. V. 685. P.78–97.
4. Ahn, J.K. Observation of reactor electron antineutrinos disappearance in the RENO experiment. Physical Review Letters. 2012. V. 108. P. 191802-1 – 191802-6.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ БАРИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СЦИНТИЛЛЯТОРА CaI_2

Новосад И.С., Новосад С.С.

Львовский национальный университет им. И.Франко,

Львов, Украина

novosadss@rambler.ru

Ранее на основе CaI_2 показана возможность получения эффективных сцинтилляторов для регистрации рентгеновского излучения [1, 2]. В спектрах возбуждения фотolumинесценции (ФЛ) неактивированного иодистого кальция при температуре 295 К на длинноволновом спаде экситонного поглощения наблюдается полоса 236 нм, связанная с неконтролируемой примесью водорода H^- [3]. При возбуждении светом в области этой полосы спектр ФЛ совпадает со спектром рентгенолюминесценции (РЛ) и представлен широкой неэлементарной полосой 410 нм. Свечение кристалла при температуре 90 К характеризуется меньшей интенсивностью с максимумом при 445 нм. Спектр низкотемпературного излучения сцинтиллятора формируется суперпозицией индивидуальных полос с максимумами около 345, 395, 430, 460 и 520 нм [4], которые связаны с автолокализованными и локализованными на дефектах экситонами. После рентгеновского возбуждения CaI_2 на кривой термостимулированной люминесценции (ТСЛ), измеренной в температурном интервале 90–295 К, наблюдаются пики при 100, 120 и 138 К [4].

Легирование иодистого кальция примесью BaI_2 (1,0 мол.%) приводит к уменьшению световыхода сцинтиллятора при 295 К на 5–10 %. При этой температуре спектр возбуждения $\text{CaI}_2:\text{BaI}_2$ содержит полосу с максимумом около 234 нм. При 90 К кроме указанной полосы, интенсивность которой значительно ослаблена, наблюдается слабая полоса в области 260–265 нм. Спектр ФЛ легированного кристалла при 295 К состоит из неэлементарной полосы с максимумом около 430 нм. Понижение температуры до 90 К приводит к ослаблению свечения и смещению максимума спектра до 505 нм. Для спектра РЛ $\text{CaI}_2:\text{BaI}_2$ при 295 К характерна неэлементарная полоса 420 нм. В спектре РЛ при 90 К кроме интенсивной широкой неэлементарной полосы 460 нм, обнаруживается слабая полоса с максимумом около 330 нм. В спектрах оптически стимулированной люминесценции, облученного рентгеновскими квантами кристалла, при 90 К наблюдаются полосы характерные для РЛ. Примесь бария существенно не влияет на запасание свето-

суммы. На кривой ТСЛ активированного кристалла, измеренной в температурном интервале 90–295 К, наблюдаются пики при 112 и 130 К.

Из полученных данных следует, что наличие Ba^{2+} в CaI_2 не приводит к появлению люминесценции экситонноподобных возбуждений, локализованных около примесных ионов. Спектры излучения $CaI_2:BaI_2$ формируются в основном элементарными полосами, характерными для матрицы [4]. Изменение спектрального состава излучения при понижении температуры от 295 до 90 К осуществляется за счет перераспределения интенсивности в пользу длинноволновых компонент свечения. Обсуждается природа центров свечения и захвата, механизмы возбуждения рекомбинационной люминесценции в полученном сцинтилляторе $CaI_2:Ba^{2+}$.

1. С.С. Новосад, Журнал технической физики, 68, № 8, 87 (1998).
2. С.С. Новосад, Журнал технической физики, 68, № 9, 71 (1998).
3. С.С. Новосад, Журнал технической физики, 69, № 1, 135 (1999).
4. С.С. Новосад, И.С. Новосад, Неорганические материалы, 44, № 8, 1014 (2008).

МУЛЬТИПЛИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ В АТОМАРНЫХ КРИОКРИСТАЛЛАХ

Огурцов А.Н., Клещев Н.Ф., Близнюк О.Н.

*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина,
anogurtsov@ukr.net*

Поскольку при любом способе возбуждения кристаллического люминофора пучками частиц высоких энергий все высоковозбуждённые состояния конденсированной системы за время 10^{-13} – 10^{-10} с релаксируют с преимущественным образованием вторичных электронов, то особенности процессов матрично-активированного переноса энергии к матрично-изолированным центрам определяются именно динамикой релаксации вторичных электронов и возбуждаемых ими экситонов, которые и являются основными переносчиками энергии электронного возбуждения в матрице [1]. В настоящей работе моделирование процессов матрично-активированного переноса энергии к матрично-изолированным центрам проведено на простейших модельных системах двухатомных гомо- (N_2) и гетероатомных (CO) примесных молекул в атомарных криокристаллах криптона и аргона. Образцы селективно возбуждались синхротронным излучением в диапазоне энергий фотонов 4–45 эВ на светосильной установке SUPERLUMI накопительного кольца DORIS-III лаборатории HASYLAB Международного синхротронного центра DESY в Германии [2].

Анализ спектров возбуждения люминесценции в системах N_2/Kr и CO/Ar позволил выделить три механизма переноса энергии матрицами атомарных криокристаллов к люминесцирующим примесным центрам [3]. В области $E < E_1$ ($E_1^{Kr} = 10,4$ эВ; $E_1^{Ar} = 12,06$ эВ – энергетическое положение дна нижней $\Gamma(3/2)$, $n = 1$ экситонной зоны) происходит прямое возбуждение примесной молекулы возбуждающими фотонами. В диапазоне $E_1 < E < E_g$ (E_g – энергия запрещённой зоны) происходит возбуждение свободных экситонов матрицы, которые, распространяясь по кристаллу, переносят энергию возбуждения к примесным молекулам азота и возбуждают их. При дальнейшем повышении энергии фотонов эффективность переноса энергии к примесным молекулам резко падает при $E > E_g$ и начинает расти только выше энергии $E > E_2$ ($E_2^{Kr} = 17,5$ эВ; $E_2^{Ar} = 21$ эВ [4]), когда в результате неупругого рассеяния фотоэлек-

тронов возбуждается молекула примеси, а у фотоэлектрона остаётся ещё достаточно энергии, чтобы возбудить вторую молекулу примеси. Спектры возбуждения показали, что именно в области энергий фотонов $E > E_2$ матрично-активированный перенос энергии к матрично-изолированным молекулам происходит наиболее эффективно. Таким образом, на модельных системах экспериментально исследованы процессы переноса энергии матрицами атомарных кристаллов криптона и аргона к двухатомным примесным молекулам N_2 и CO. Выделены три диапазона фотонных энергий возбуждения системы матрица-примесь, различающиеся механизмами заселения примесных возбуждённых молекулярных состояний. Матрично-активированный перенос энергии к примесным двухатомным молекулам в кристаллах Ag и Kr наиболее эффективен в области неупругого рассеяния фотоэлектронов матрицы, сопровождающегося мультипликацией электронных возбуждений.

1. А.Н. Огурцов, *Модификация кристаллов электронными возбуждениями*: монография, 368 с., Харьков: НТУ "ХПИ", (2009).
2. A.N. Ogurtsov, In: *Spectroscopy of Emerging Materials*, Ed. by E.C. Faulques et al., 45–56, Kluwer, (2004).
3. А.Н. Огурцов, О.Н. Близнюк, Н.Ю. Масалитина, *ИТЭ*, №1, 54–58, (2013).
4. A.N. Ogurtsov, E.V. Savchenko, J. Becker, M. Runne, G. Zimmerer, *Chem. Phys. Lett.*, **281**, № 4–6, 281–284 (1997).

АКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПЕРЕКОМПЕНСАЦИИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ CdTe:Cl

Олих Я.М., Тимочко Н.Д.

*Институт физики полупроводников им. В.Е.Лашкарёва НАНУ, Киев, Украина,
jaroluk3@ukr.net, tymochko@ukr.net*

Монокристаллы теллурида кадмия используются в качестве неохлаждаемых детекторов X- и γ -излучения. Особый интерес для практических целей представляют кристаллы с примесью хлора, который может создавать метастабильные комплексы с собственными дефектами. Проводимость в легированных кристаллах CdTe:Cl определяется сложными эффектами компенсации как собственными, так и введенными дефектами и их комплексами. Для улучшения структурного качества таких соединений применяют различные физические обработки: γ -облучение, термический отжиг, обработку в водороде, СВЧ-облучение, а также ультразвуковую (УЗ) обработку. Учитывая большую плотность дислокаций ρ_d в кристаллах A_2B_6 и высокую эффективность акусто-дислокационного взаимодействия, УЗ является наиболее простым из перечисленных внешних воздействий. Распространение интенсивной УЗ волны индуцирует колебания дислокаций; причем при $W_{US} \sim 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $\rho_d \sim 10^{10} \text{ м}^{-2}$ фактически весь кристалл подвергается колебательной деформации и перестройка дефектов происходит во всем объеме образца. Заметим, что в зависимости от состояния примесно-дефектной структуры и параметров УЗ волны, на эксперименте могут реализоваться как остаточные изменения, так и временные, наблюдаемые лишь во время воздействия УЗ. В докладе уделено внимание именно динамическим изменениям.

Для выяснения природы подвижного в УЗ поле дефекта проведены температурные (77÷300 К) исследования эффекта Холла на объемных кристаллах CdTe:Cl ($N_{Cl} = (5 \cdot 10^{23} \div 10^{25}) \text{ м}^{-3}$) n и p -типа в условиях УЗ воздействия ($f_{УЗ} = (5 \div 17) \text{ МГц}$, $W_{US} = (0 \div 10^4) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) в динамическом режиме (*in-situ*). Установлено, что для CdTe:Cl n -типа наблюдаемые акустостимулированные (АС) изменения концентрации n и подвижности μ обратимы, после прекращения УЗ воздействия электрофизические параметры (ЭФП) образца возвращаются в исходное состояние. Неодинаковый характер релаксации n и μ , как при включении ультразвука так и при его выключении, определяется температурой образца и свидетельствует о различных механизмах перестройки

точечно-дефектной структуры кристалла – практически мгновенные при температурах $T > 200$ К и долговременные ($1 \div 100$ с) при $T < 160$ К. Для этих температурных областей, где наблюдаются отличительные особенности АС эффектов, обсуждаются разные механизмы АС изменений ЭФП, включая дополнительное рассеивание носителей на акустически возмущенной системе тепловых колебаний решетки и на колеблющихся дислокациях. Основным перекомпенсационным процессом при включении ультразвука представляется преобразование акцепторного комплекса $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^{+})^-]$ в нейтральный $[(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0]$, с временным диффузионным привлечением атомов Cl, которые в равновесном состоянии расположены на дислокациях. При выключении ультразвука – процесс обратный, поскольку термодинамически равновесная вероятность образования комплекса $[(V_{Cd}^{2-}Cl_{Te}^{+})^-]$ значительно больше чем для комплекса $[(V_{Cd}^{2-}2Cl_{Te}^{+})^0]$.

Таким образом, можно предложить использование ультразвука как для модификации (модуляции) рабочих характеристик детекторов, так и в качестве дополнительной методики изучения процессов перекомпенсации дефектов в CdTe:Cl.

НЕЙТРИННАЯ ПРОГРАММА ОИЯИ

Ольшевский А.Г.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
olshevsk@gmail.com

В докладе обсуждается современное состояние и роль исследований в нейтринной физике для дальнейшего развития физики элементарных частиц. Показано, что нейтринная физика на современном этапе является одним из наиболее перспективных направлений для получения информации о возможных расширениях существующей теории. Обсуждаются приоритетные с этой точки зрения проблемы и эксперименты, нацеленные на их решение, а также роль в этих экспериментах ОИЯИ. Демонстрируется, что новые проекты, нацеленные на решение приоритетных задач нейтринной физики, неразрывно связаны с прогрессом в области развития технологий создания новых сцинтилляционных материалов и фотодетектирования.

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРАХ НА ОСНОВЕ ФЭУ

Педаш В.Ю.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
pedash@gmail.com*

Наиболее распространенными аналоговыми методами временной привязки в сцинтилляционных детекторах являются метод следящего порога, и привязка по переднему фронту импульса с низкоуровневым дискриминатором. Небольшая задержка по отношению к анодному и более крутой фронт импульса с динода дает возможность реализовывать несколько схемных решений для повышения временного разрешения, сходных с теми, что применяются в методе со следящим порогом. В работе рассмотрены несколько схем, основанных на одновременном использовании комбинаций импульсов с последнего, предпоследнего динодов и анода. Для каждой из рассматриваемых схем сделан анализ влияния на временную привязку следующих негативных факторов: изменение амплитуды импульса, наличие шумов, джиттер времени пролета электронов. На основе этого анализа сделаны рекомендации касательно условий для оптимального применения каждой схемы. Приводятся экспериментальные результаты, полученные на детекторах состоящих из кристаллов BGO $10\times 10\times 10$ мм и ФЭУ Hamamatsu R1924. Показано, что использование предложенных схем позволяет увеличить временное разрешение на 10–20%.

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ГРАФИТОВЫХ НАНОПЛАСТИН ДЛЯ ЭКРАНИРОВКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Плющ А.О.¹, Кужир П.П.¹, Мацуткевич Я.², Банис Ю.²,
Мицциулла Ф.³, Каталдо А.³, Беллуччи С.³
¹Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,
²Вильнюсский университет, Вильнюс, Литва,
³Национальный институт ядерной физики, Фраскати, Италия,
artyom.plyushch@gmail.com

Композиционные материалы на основе графитовых нанопластин (ГНП) (Рис. 1 (а)) в настоящее время представляют собой альтернативу материалам на основе углеродных нанотрубок (УНТ).

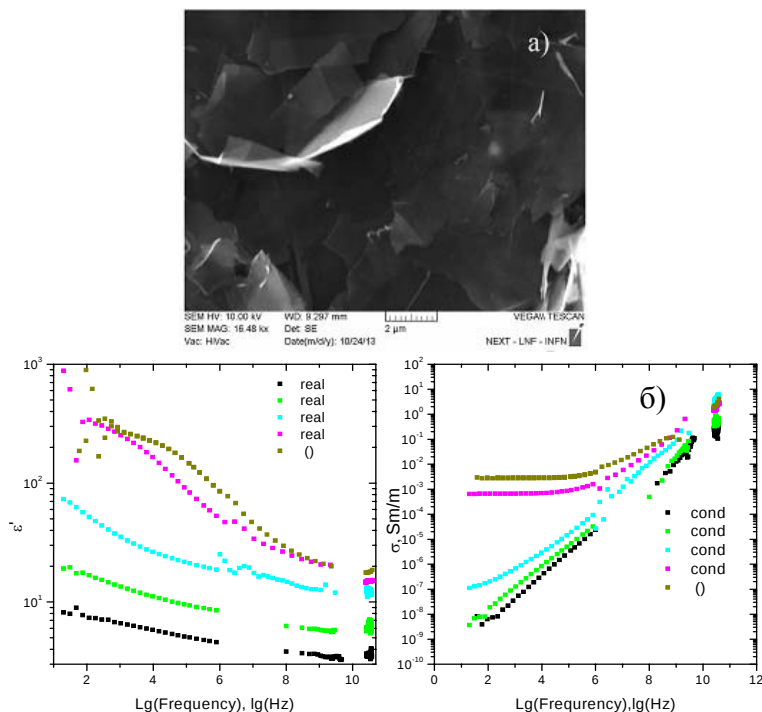


Рис. 1. а) Сканирующая электронная микроскопия графитовых нанопластин в эпоксидной матрице; б) спектр диэлектрической проницаемости и проводимости композитов с содержанием ГНП 0.25–4 вес. %

Оба типа материалов – весьма перспективные кандидаты для решения проблемы электромагнитной совместимости и электромагнитной экранировки. Однако, в отличие от нанотрубок, ГНП являются двумерной структурой, поэтому следует ожидать меньший порог перколяции, кроме того, процесс получения интеркалированного графита и последующее его термическое расширение существенно проще и дешевле синтеза УНТ.

По методике, более подробно описанной в статье [1], были подготовлены экспериментальные образцы с концентрациями 0.25–4 вес. %.

Был проведен диэлектрический анализ (от 20 Гц до 40 ГГц) образцов. Установлено, что материал характеризуется низким порогом перколяции (2.87 вес. %), высокими значениями проводимости ($3 \cdot 10^{-2}$ См/м для образца с 4 вес. %).

1. P. Kuzhir et al. Microwave probing of nanocarbon based epoxy resin composite films: toward electromagnetic shielding. Thin Solid Films, 519(12), 4114 – 4118, 1 April (2011).

УЛУЧШЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И ПОГЛОЩАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НАНОЧАСТИЦАМИ С ТЯЖЕЛЫМИ АТОМАМИ

Покидов А.П., Классен Н.В., Шмытько И.М.,
Кедров В.В., Фурсова Т.Н.

*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия,
pokidov@issp.ac.ru; klassen@issp.ac.ru*

Органические сцинтилляторы на основе синтетических полимеров с органическими же активаторами выгодно отличаются сочетанием наносекундного быстрого действия и высокого световыхода. Благодаря относительной простоте изготовления они характеризуются невысокой себестоимостью и практическим отсутствием габаритных ограничений. Но с другой стороны органические сцинтилляторы имеют два серьезных минуса: низкую радиационную прочность и слабую поглощательную способность гамма-квантов. Последнее обстоятельство является следствием вхождения в их состав исключительно легких атомов, что многократно снижает сечение захвата ионизирующих излучений (за исключением нейтронов). Проведенные нами ранее исследования композитных сцинтилляторов из органических люминофоров и неорганических наночастиц с тяжелыми атомами показали, что введение целого ряда тяжелых наночастиц не ухудшает быстрого действия и световыхода, присущих органическим сцинтилляторам, но на много порядков увеличивает поглощательную способность материала. Это обусловлено тем, что указанные наночастицы, намного сильнее поглощая энергию радиации, за счет своих малых размеров эффективно передают значительную ее часть органическому люминофору посредством переизлучения вторичных электронов и мягких гамма-квантов, а также контактным возбуждением молекулярных экситонов в интерфейсе органика – неорганика. Исследования колебательных спектров такого рода композитов показали, что в целом ряде случаев (например, при смешивании полистирола и сульфата цезия) в интерфейсах формируются прочные химические связи между органическими молекулами и неорганическими наночастицами, которые, в частности, способны работать передаточными мостиками между тяжелыми наночастицами, поглощающими гамма-кванты, и органическими молекулами, преобразующими часть их энергии в световое излучение. С

другой стороны, формирование указанных связей может существенно повысить радиационную прочность органических сцинтилляторов. Это обусловлено тем, что прочные связи тяжелых наночастиц с молекулами существенно уменьшает амплитуду тепловых колебаний последних за счет многократного увеличения совокупной массы. В результате при разрыве межатомных связей в молекулах ионизирующим излучением оборванные концы не расходятся в результате теплового движения (что типично для свободных полимерных молекул и практически сводит к нулю вероятность обратного заживления разрыва), а остаются в непосредственной близости друг от друга, многократно повышая вероятность восстановления разорванной связи. К этой ситуации уместно применить медицинскую аналогию, когда места переломов костей иммобилизируются гипсовыми повязками, что гарантирует их сращивание. Совокупные исследования радиационной и механической прочности, сцинтилляционных характеристик, колебательных и оптических спектров композитов из органических сцинтилляторов и неорганических наночастиц позволяют определить их оптимальные химические составы и морфологические характеристики для использования плюсов органических сцинтилляторов при повышенных радиационных нагрузках, что раньше не представлялось возможным из-за низких уровней радиационной прочности и поглощательной способности органики. Кроме того, повышение радиационной прочности органических материалов наночастицами представляет интерес и для солнечной энергетики, т. к. слабая устойчивость полимеров к ультрафиолету является серьезным препятствием для практического внедрения органических солнечных элементов.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рогожин А.А.
ВИМС, Москва, Россия,
rogoin@df.ru

В докладе будут изложены принципы создания диагностических устройств с использованием сцинтилляционного метода регистрации гамма-излучения и нейтронов для внутрискважинных и наружных измерений при геологоразведке месторождений углеводородов. Обсуждаются преимущества и недостатки внутрискважинного карротажа, а также перспективы новых сцинтилляционных материалов для измерения параметров месторождений.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ПОЛЯ ПРИ МЕДИЦИНСКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ И ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУРАХ

Рыжиков В.Д.¹, Гринёв Б.В.¹, Волков В.Г.²,
Ополонин А.Д.², Махота С.В.¹, Попкова Е.В.²

¹*Институт монокристаллов НАНУ, Харьков, Украина,*

²*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
volkov@isma.kharkov.ua*

При медицинских диагностических и терапевтических процедурах важно знать и фиксировать параметры рентгеновского поля, включая мощность дозы, в зоне нахождения пациента. В Украине эксплуатируются различные приборы, позволяющие выполнять требуемые измерения. Однако по критерию цена–качество они не получили широкого распространения. Прибор УКРЭХ российского производства не отвечает современным требованиям по удобству для пользователей и техническим характеристикам (стоимость 3000 USD) [1]. Шведский универсальный дозиметр рентгеновского излучения "Unfors Xi" – прибор нового поколения для контроля электрических и радиационных характеристик медицинских рентгеновских аппаратов [2], но его стоимость (около 13000 USD) делает невозможным широкое оснащение медицинских учреждений в Украине.

Поэтому разработка и внедрение современного недорогого украинского прибора признано актуальной задачей.

Авторам удалось разработать образец такого прибора, внедрение которого во все медицинские учреждения, где используется рентгеновская техника, позволит значительно повысить качество диагностических и терапевтических процедур с фиксацией в карте пациента всех параметров воздействия рентгеновским излучением.

Прибор состоит из выносного блока детектирования, процессорного блока усиления, оцифровки и передачи данных и персонального компьютера (ПК), в котором установлена оригинальная программа. В качестве ПК может быть использован как ноутбук или нетбук, так и стационарный компьютер. Программа и интерфейс позволяют адаптировать прибор и под современные ПК, так и под устаревшие модели. Единственным неперенным условием является наличие USB-порта.

В составе блока детектирования находится комбинированный детектор, который под воздействием рентгеновского поля выдает два

сигнала. Сигналы формируются детекторами, чувствительными в двух энергетических окнах рентгеновского поля. Абсолютные уровни сигналов и их соотношение позволяют вычислить: анодное напряжение на рентгеновском излучателе и мощность дозы. Фиксация отсчетов с временными метками позволяет вычислить время экспозиции, практическое пиковое напряжение на аноде и дозу излучения.

Путем варьирования энергетической зависимостью чувствительности детекторов можно оптимизировать измерения под различные виды диагностики: маммография (20–50 кВ), общая рентгенодиагностика (60–120 кВ), компьютерная томография (80–150 кВ), дентальная рентгенодиагностика (40–110 кВ), флюорография (40–130 кВ).

1. Блинов Н.Н., Костылев В.А., Наркевич Б.Я. Физические основы рентгенодиагностики. М.: АМФ-Пресс, 2002. 74 с.
2. www2.unfors.se.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО ФОТООТКЛИКА В МИКРОПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДАХ

Садыгов З.Я., Абдуллаев Х.И., Ахмедов Г.С., Ахмедов Ф.И.,
Бокова Т.Ю., Жежер В.Н., Мухтаров Р.М.,
Садыгов А.З., Сиделев А.В., Титов А.И.

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия,
zsadygov@gmail.com*

В настоящей работе приведена физическая модель развития и гашения лавинного процесса в микропиксельных лавинных фотодиодах (МЛФД). Нами рассмотрен пиксель МЛФД представляющий собой $p^+ - i - n^+$ структуру с термической емкостью C_p , индивидуальным сопротивлением R_p и напряжением пробоя U_{br} . Напряжение $U > U_{br}$, приложенное к пикселю, создает в i -слое толщиной W однородное электрическое поле величиной $E = U / W$, достаточной для развития Гейгеровского разряда.

Единичный фотоэлектрон, появившийся в i -области, например, около p^+ - слоя пикселя, проходя всю толщину W , создает новые электрон-дырочные пары, причем значительная часть электрон-дырочных пар создается около n^+ - слоя. Аналогичный характер имеет лавинный процесс, инициированный единичной дыркой, т.е. основная часть электрон-дырочных пар создается около p^+ - слоя. Поэтому в предложенной модели предполагается, что процесс ударной ионизации электронами и дырками имеет место только в двух тонких областях толщиной $d \ll W$, расположенных соответственно у анодного и катодного электродов пикселя.

Моделирование работы пикселя МЛФД показывает, что характерные длительности переднего и заднего фронтов тока разрядки I имеют одинаковую величину, которая не превышает 50 ps . Такую же длительность имеет передний фронт внешнего тока зарядки J . В то же время, задний фронт тока J имеет большую величину, и он определяется параметром $C_p \times R_p$ электрической цепи пикселя. Установлено, что эффективная емкость пикселя, определяемая как $C_{eff} = \partial Q_e / \partial U$, где Q_e – полный заряд одноэлектронного сигнала, в два раза больше термической емкости пикселя C_p .

ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТОК СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛОВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Сидлецкий О.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина
sidletskiy@isma.kharkov.ua*

Одной из заметных тенденций разработок новых сцинтилляционных кристаллов являются смешанные материалы (твердые растворы) на основе изовалентного замещения атомов в матрице. В рамках данного подхода в последнее время получены ряд эффективных сцинтилляторов на основе смешанных кристаллов, световой выход которых значительно превосходит световой выход компонентов смешанного кристалла. Примерами таких материалов являются $Gd_3(Al_{1-x}Ga_x)_5O_{12}:Ce$ [1], $Lu_{2-2x}Gd_{2x}SiO_5:Ce$ [2], $BaBr_{1-x}I_x:Eu$ [3], $Lu_{1-x}Y_xAlO_3:Ce$ [4] и ряд других систем. В то же время известны системы, например $Lu_{2-2x}Y_{2x}SiO_5:Ce$ [5], в которых световой выход изменяется плавно в зависимости от соотношения замещаемых атомов, без существенных отклонений от аддитивности. Остается открытым вопрос, можно ли предсказать световой выход смешанного кристалла на основе физических свойств его компонентов.

В докладе систематизированы имеющиеся в наличии данные по световому выходу сцинтилляторов на основе смешанных кристаллов. В дополнение к предложенной нами ранее феноменологической модели для предсказания светового выхода смешанных кристаллов на основе соотношения ионных радиусов замещаемых атомов [6], анализируется величина отклонения светового выхода от аддитивности в зависимости от соотношения атомных весов замещаемых атомов, ширины запрещенной зоны компонентов смешанного кристалла и других физических параметров.

1. O.Sidletskiy, A. Belsky, A. Gektin, S. Neicheva, D. Kurtsev, V.Kononets,Ch. Dujardin, K.Lebbou, O. Zelenskaya, V. Tarasov, K. Belikov, and Boris Grinyov. *Crystal Growth & Design*, 2012, 12, 441.
2. K. Kamada, T. Endo, K. Tsutumi, T. Yanagida, Y. Fujimoto, A. Fukabori, A. Yoshikawa, J. Pejchal, and M. Nikl, *Cryst. Growth Des.*, 2011, 11, 4484.
3. E. D. Bourret-Courchesne, G. A. Bizarri, R. Borade, G. Gundiah, E. C. Samulon, Z. Yan, and S. E. Derenzo, *J. Cryst. Growth*, 2012, 352, 78.
4. A. N. Belsky, E. Auffray, P. Lecoq, C. Dujardin, N. Garnier, H. Canibano, C. Pedrini, and A. G. Petrosyan, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 48, 1095 (2001).
5. J. Chen, L. Zhang, and R.-Y. Zhu, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2005, 51, 3133.
6. O. Sidletskiy, A.Gektin, and A. Belsky. *Phys. Status Solidi A*, 1–4 (2014) / DOI 10.1002/pssa.201431137.

ПОЛУЧЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{Lu}_{2x}\text{Gd}_{2-2x}\text{SiO}_5\text{:Ce}$ (LGSO:Ce) С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Сидлецкий О.Ц.¹, Бондарь В.Г.¹, Гринёв Б.В.¹, Курцев Д.А.¹,
Катрунов К.А.¹, Тарасенко О.А.¹, Зеленская О.В.¹, Тарасов В.А.¹,
Баумер В.Н.², Беликов К.Н.²

¹Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,

²НТК «Институт монокристаллов» НАНУ, Харьков, Украина,
kurcev@isma.kharkov.ua

Основными областями применения оксидных сцинтилляторов на сегодняшний день являются медицинское диагностическое оборудование, системы безопасности и радиационного мониторинга, детекторы для геологической разведки, а также эксперименты физики высоких энергий. Однако современные оксидные сцинтилляторы на основе оксиортосиликатов имеют ряд недостатков, а именно: низкий световой выход и склонность к растрескиванию (GSO:Ce); сильное послесвечение, собственный радиоактивный фон, а также высокая стоимость Lu-содержащих кристаллов (LSO:Ce, LYSO:Ce). Поэтому актуальной задачей является получение других систем смешанных оксиортосиликатов, в которых эти недостатки могут быть устранены либо минимизированы. Перспективной и относительно мало изученной, является система смешанных оксиортосиликатов $\text{Lu}_{2x}\text{Gd}_{2-2x}\text{SiO}_5\text{:Ce}$ (LGSO:Ce) [1]. Целью работы была разработка технологических условий получения сцинтилляционных кристаллов LGSO:Ce с улучшенными характеристиками.

В работе были исследованы условия выращивания смешанных оксиортосиликатов LGSO:Ce методом Чохральского с различным соотношением Lu/Gd. Изучены структура кристаллов, особенности вхождения активатора и заселенности катионных позиций в кристаллах на основе LGSO:Ce, уточнены концентрационные интервалы существования полиморфных модификаций. Проведены измерения механических, сцинтилляционных, оптических свойств кристаллов LGSO:Ce в зависимости от соотношения Lu/Gd. Определены режимы послеростового отжига кристаллов LGSO:Ce для оптимизации сцинтилляционных характеристик.

В результате получены крупногабаритные кристаллы LGSO:Ce диаметром до 35 и длиной до 150 мм без трещин. Определены технологические условия получения кристаллов $\text{Lu}_{2x}\text{Gd}_{2-2x}\text{SiO}_5\text{:Ce}$ с улучшенными характеристиками: световым выходом 29000 фот/МэВ (34000 фот/МэВ при соактивировании Ca^{2+}), энергетическим разрешением 6.7%, уровнем послесвечения – 0.025–0.1% после 5 мс, основным компонентом затухания 50 нс. Установлено, что оптимальное соотношение сцинтилляционных характеристик наблюдается при $x = 0.4\text{--}0.6$. Концентрация церия не должна превышать 0.6 ат. %.

1. Глобус М.Е., Гринев Б.В. Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы. Х.: Акта, 2001. 408 с., стр. 21–34.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В КРИСТАЛЛЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОЛЛИМАЦИИ НА ОСНОВЕ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ

Сытов А.И.^{1,2}, Сафронов И.В.²

¹*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,*

²*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
alex_sytov@mail.ru, fiz.safronov@mail.ru*

Система коллимации на основе изогнутых кристаллов в будущем призвана защитить оборудование ускорителей и коллайдеров от гало пучка – частиц, достигших опасного значения амплитуды бетатронных и синхротронных колебаний. Эта система, в частности, имеет принципиальное значение для проекта Большого адронного коллайдера на высокой светимости [1], поскольку позволяет значительно снизить радиационную нагрузку на сверхпроводящие магниты. Основная идея коллимации на основе кристаллов заключается в отклонении большинства частиц гало непосредственно на поглотитель за одно прохождение кристалла в режиме каналирования.

Основная доля потерь частиц происходит вследствие непопадания некоторых из них в режим каналирования и их повторного прохождения через кристалл. Вероятность захвата в режим каналирования определяется распределением пучка на входе в кристалл. В данной работе показано, что это распределение сильно зависит от распределения частиц по энергиям и так называемых синхротронных колебаний. Дополнительный вклад вносят ионизационные потери энергий частиц.

В работе проведено моделирование планируемого эксперимента на Большом адронном коллайдере по коллимации на основе изогнутых кристаллов [2] и проанализирована зависимость эффективности коллимации от ионизационных потерь высокоэнергетичных протонов. Ионизационные потери заряженных частиц могут оказать значительное влияние на их траекторию и привести к их выбыванию из зоны стабильности синхротронных колебаний и неконтролируемому росту отклонения частиц от идеальной траектории за счет изменения энергии.

Также проведено моделирование ионизационных потерь протонов энергией 7 ТэВ в режиме каналирования, в частности, показано, что при каналировании с критической амплитудой ионизационные потери могут превысить потери энергии в случайном направлении. Этот эффект необходимо учитывать особенно в случае деканалирования частиц и,

как следствие, их отклонения на недостаточный угол для попадания на поглотитель.

При моделировании траекторий частиц в кристалле была использована программа CRYSTAL [3]. Работа поддерживается грантом БРФФИ-Минобразование М Ф14МВ-010.

1. Rossi L. et al. High Luminosity Large Hadron Collider. A description for the European Strategy Preparatory Group. 2012. 22 p.
2. D. Mirarchi et al. Proc. of IPAC2014. 2014. MOPRI110 P. 882–885.
3. А. Сытов. Вестник БГУ. 2014. Сер. 1. №2. С. 48–52.

О ВЛИЯНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАЛОРИМЕТРОВ

Тихомиров В.В.

*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,
vvtikh@mail.ru*

На протяжении шестидесяти лет были теоретически предсказаны и подробно исследованы когерентное тормозное излучение и образование электрон-позитронных пар, а затем высокоэнергетический магнитотормозной предел излучения при каналировании и родственный ему процесс образование пар [1]. Эти процессы приводят к значительному ускорению развития электромагнитных каскадов по сравнению с аморфным веществом [2] и сопровождаются широким спектром поляризационных явлений [1].

В то же время многие детекторы, такие как Compact Muon Solenoid (CMS) [3] и Fermi Gamma-Ray Space Telescope [4], используют $e^\pm$, γ калориметры на основе таких кристаллов, как PWO_4 и $CsI(Tl)$. Несмотря на то, что возможность значительного усиления радиационных процессов в кристаллах несколько десятилетий изучалась в ЦЕРН и других научных центрах, она не используется и даже не учитывается в работе установок, подобных [3, 4]. Следствием этого явился прямой ущерб их использованию по их прямому назначению. В частности, остаются без объяснения как расхождение значений массы бозона Хиггса, измеренных в канале $H \rightarrow \gamma\gamma$ на установках CMS и ATLAS (124.70 ± 0.34 ГэВ и 125.98 ± 0.50 ГэВ, соответственно), так и низкая точность калибровки установки [4]. В то же самое время с высокой вероятностью эти проблемы могут быть разрешены при правильном учете ориентационной зависимости радиационных процессов в кристаллах PWO_4 и CsI .

Очевидно также, что своевременный учет этой зависимости помог бы избежать подобных проблем путем минимизации и правильного учета влияния кристаллической структуры на радиационные процессы. Более продуктивным, однако, представляется альтернативный подход, заключающийся в использовании влияния кристаллической структуры для повышения эффективности электромагнитных калориметров и гамма-телескопов, возможности которого быстро расширяются с ростом энергий регистрируемых частиц. В полной мере этот подход может

быть реализован только при разработке новых глобальных установок, таких как Future Circular Collider [5] и его детекторы. Активно обсуждающиеся конструкции последних предполагают примерно миллирадианную угловую расходимость $e^{\pm}$, γ , рождающихся в областях с высокой псевдобыстротой и имеющих наиболее высокие энергии. Такая расходимость позволит проявиться ориентационным явлениям в кристаллах и, как минимум, в несколько раз повысить скорость развития электромагнитных каскадов в детекторах и обеспечить возможность измерения поляризации $e^{\pm}$, γ .

1. Барышевский В.Г., Тихомиров В.В. УФН. 1989. Т. 159, N 3. С. 529–564.
2. Bandiera L., Bagli E., Guidi V., Mazzolari A., Berra A., Lietti D., Prest M., Vallazza E., De Salvador D., and Tikhomirov V. // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111. N 25. 255502.
3. CMS Collaboration et al., JINST 3, S08004 (2008).
4. Atwood W.B. et al., Astrophys. J. 2009. Vol. 697. 1071.
5. Benedikt M., Zimmermann F. The Future Circular Collider study CERN Courier 2014. Vol. 54. P. 16.

МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЭКСПЕРИМЕНТА GlueX

Толстухин И.А.¹, Сомов А.С.², Сомов С.В.¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Москва, Россия,

²Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, VA, USA,
ivantol@jlab.org

Эксперимент GlueX посвящен изучению природы конфайнмента [1, 2]. Предполагается наблюдать экзотические мезоны в реакции фоторождения при энергии продольно поляризованных фотонов 9 ГэВ. Фотоны образуются в результате когерентного тормозного излучения электронов ускорителя CEBAF лаборатории Томаса Джефферсона с энергией 12 ГэВ на алмазном радиаторе [1, 2].

Спектрометр γ -квантов применяется для прецизионного (1%) измерения энергии продольно поляризованных фотонов. Фотон образует электрон-позитронную пару в тонком конвертере ($\sim 10^{-3}$ радиационной длины), расположенном в пучке перед дипольным магнитом. Отклоненные в магните электроны и позитроны регистрируются магнитным спектрометром – два скintилляционных годоскопа, каждый из которых состоит из 145-ти тонких (1–2 мм) скintилляционных пластин. Регистрация света в каждом канале осуществляется кремниевыми фотоумножителями SiPM Hamamatsu с эффективной чувствительной площадью 3×3 мм². Схема расположения элементов магнитного спектрометра [3] показана на Рис.1.

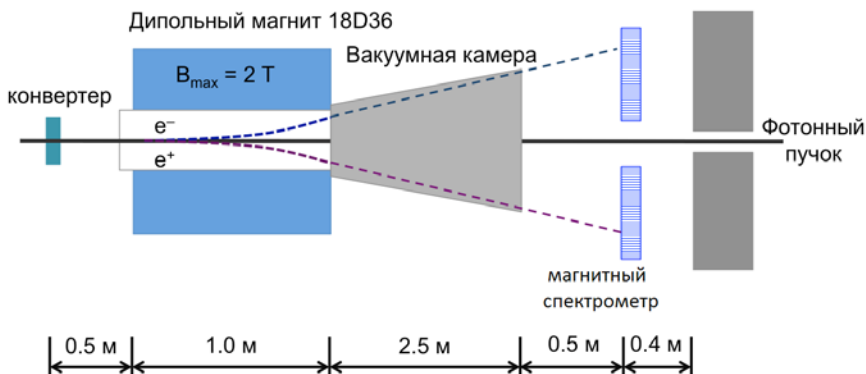


Рис.1. Схема расположения элементов парного спектрометра

Результаты испытания регистрирующей части спектрометра на пучке ускорителя электронов показали среднее количество фотоэлектронов около 30 для сцинтилляторов толщиной 1 мм и 2 мм.

1. GlueX collaboration. An initial study of mesons and baryons containing strange quarks with GlueX, arXiv:1305.1523v1 [nucl-ex] 7 May 2013.
2. GlueX Collaboration. A study of meson and baryon decays to strange final states with GlueX in Hall D, Presentation to PAC 39, 2012, http://www.gluex.org/docs/pac39_proposal.pdf
3. Сомов А.С., Сомов С.В., Толстухин И.А. Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. № 7. С. 1.

ВОЗМОЖНОСТИ КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКОГО ПОДХОДА К СИНТЕЗУ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Третьяк Е.В.¹, Шевченко Г.П.¹, Антанович А.В.¹,
Шишко Г.В.¹, Бокшиц Ю.В.¹, Коржик М.В.²,
Малашкевич Г.Е.³, Кичанов С.Е.⁴

¹ Институт физико-химических проблем Белгосуниверситета, Минск, Беларусь,

² Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,

³ Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,

⁴ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия,
slon.zhenya@gmail.com

В последнее время все большее количество работ посвящено получению оптических материалов в виде керамики или стекло-керамики, что связано с рядом их преимуществ перед монокристаллами. Прежде всего это меньшая энергозатратность, а также возможность формовки изделия при производстве по сравнению с монокристаллами. Важным этапом при получении как керамики, так и стеклокерамики является синтез вещества с размером частиц в нанометровом диапазоне. Экономически выгодным способом формирования таких нанопорошков по сравнению с классическим (твердофазным) синтезом являются методы коллоидной химии, в частности, совместное соосаждение соединений металлов (гидроксидов, карбонатов, оксалатов и др.) из раствора, при котором возможно в широких пределах варьировать условия синтеза и тем самым управлять составом, структурой, морфологией и, соответственно, рабочими характеристиками конечного продукта.

В настоящей работе представлены результаты проводимых в лаборатории нанохимии исследований процессов синтеза с использованием методов коллоидной химии наноразмерных сложнооксидных систем, активированных ионами РЗЭ, и композитов на их основе, а также влияния условий синтеза на их структурные особенности и спектрально-люминесцентные свойства.

Установлено, что для систем $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$, $Lu_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$, $Lu_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ + оксид, $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ + оксид (оксид = Lu_2O_3 , $HfO_2:Y$, Y_2O_3) изменение их спектрально-люминесцентных свойств связано с изменением кристаллографического окружения оптически-активного иона Ce^{3+} происходящего преимущественно за счет искажения кислородного октаэдра Al-O [1]. Для системы $SiO_2@YAG:Ce$ определены параметры, обеспечивающие формирование структуры типа “ядро–оболочка”. Для систем

$\text{BaHfO}_3\text{:Ce}^{3+}$ и $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4\text{:Ce}^{3+}$, Dy^{3+} , Pr^{3+} и установлены препаративные особенности синтеза (тип осадителя, условия термообработки, использование стабилизирующих добавок, соотношение реагентов и др.), оказывающие влияние на их структурные и люминесцентные свойства.

В докладе также будет представлена информация о возможности получения прозрачной керамики на основе порошков $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{:Ce}^{3+}$ + оксид, которая обладает высокой эффективностью радиолюминесценции и повышенной плотностью по сравнению с LuAG:Ce [2].

1. S.E. Kichanov et al. The structural and luminescent properties of $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{:Ce}^{3+} + \text{Lu}_2\text{O}_3$ crystal phosphors prepared by colloid chemical synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 613. С.238–243.
2. Г.П. Шевченко и др. Формирование сцинтилляционной прозрачной керамики « $\text{LuAG:Ce} + \text{Lu}_2\text{O}_3$ » из нанодисперсных порошков, синтезируемых коллоидно-химическим способом. Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2013. Т. 56, №6. С.56–62.

ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ЛИТИЕВОГО СТЕКЛА И КРЕМНИЕВОГО ФОТОЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ

Федоров А.А.¹, Коржик М.В.¹, Козлов Д.М.¹,
Лобко А.С.¹, Мусиенко Ю.В.²

¹*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,*

²*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия,
andrei.fedorov@cern.ch*

В данной работе мы исследуем прототип малогабаритного детектора тепловых нейтронов на основе недавно разработанного кремниевого фотоэлектронного умножителя PM3350 производства KETEK с размером чувствительной области 3×3 мм² и сцинтилляционного элемента размерами $3 \times 3 \times 2$ мм³, изготовленного из активированного церием литиевого сцинтилляционного стекла. Кремниевые фотоэлектронные умножители представляют собой матрицу параллельно соединенных фотодиодов (3600 в случае PM3350), работающих в гейгеровском режиме, и имеют высокий коэффициент усиления (умножения). Фотоэлектронный умножитель PM3350 имеет коэффициент усиления 2×10^6 и квантовую эффективность около 50%, что обеспечивает низкий уровень шумов и хорошее энергетическое разрешение даже в сочетании со сцинтилляционными материалами с относительно низким световыходом, такими как литиевое стекло.

Нами были измерены амплитудные спектры источников тепловых нейтронов ²⁵²Cf, ²⁴¹Am-Be, источника альфа-частиц ²⁴¹Am, гамма-источника ¹³⁷Cs. Полученные результаты, например, энергетическое разрешение FWHM=12% по тепловым нейтронам от ²⁴¹Am-Be, позволяют сделать вывод о перспективности применения подобных детекторов как в малогабаритных персональных дозиметрах, так и приборах измерения нейтронов, требующих высокого временного и пространственного разрешения.

СНИЖЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ЛИТИЕВЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СТЕКОЛ К ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

Федоров А.А., Лобко А.С., Коржик М.В., Козлов Д.М.

*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,
andrei.fedorov@cern.ch*

Традиционно в течение последних десятилетий в системах радиационной безопасности и экологического мониторинга в качестве детекторов тепловых нейтронов использовались счетчики на основе ^3He . Но непрекращающееся удорожание ^3He наряду с увеличением спроса на него заставляет производителей систем радиационной безопасности и экологического мониторинга искать альтернативы в твердотельных нейтронных детекторах. Активированные церием сцинтилляционные стекла, содержащие Li-6, наиболее предпочтительны при регистрации тепловых нейтронов с точки зрения отношения эффективность/стоимость. Однако в случае проведения точных измерений нейтронной компоненты в присутствии интенсивного фонового гамма-излучения главной проблемой становится повышенная относительная чувствительность твердотельных нейтронных детекторов к гамма-излучению по сравнению с гелиевыми счетчиками. По нашим оценкам для столь же успешного применения в точных измерениях в смешанных полях излучений чувствительность твердотельных нейтронных детекторов на основе литиевых стекол к гамма-излучению должна быть понижена в 10–100 раз, что является весьма сложной задачей.

В данной работе проводится анализ различных методов снижения чувствительности нейтронных детекторов на основе сцинтилляционных литиевых стекол к гамма-излучению, таких как улучшение амплитудной селекции событий за счет улучшения энергетического разрешения при оптимизации светосбора в детекторе, возможности временной селекции при разделении нейтронных и гамма-событий по форме сцинтилляционного импульса, физические методы снижения гамма-нейтронного отношения световых выходов детектора, использование независимого измерительного гамма-канала для коррекции показаний нейтронного канала. Приводятся оценки пределов снижения чувствительности сцинтилляционных литиевых стекол к гамма-излучению различными методами и их комбинациями.

ФОРМИРОВАНИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АЛЮМОИТТРИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРБИЕМ, В ПОРИСТОМ АНОДНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ

Хорошко Л.С.¹, Гапоненко Н.В.¹, Кортон², Пустоваров В.А.²

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,

² УрФУ им. Б.Ельцина, Екатеринбург, Россия,
nik@nano.bsuir.edu.by

Легированные лантаноидами материалы – оксиды, гранаты, перовскиты, синтезированные в виде тонких пленок, объемных материалов и наполнителей в пористых матрицах, являются перспективными для разработки новых материалов преобразования и детектирования ионизирующих излучений. В данной работе приведены результаты исследования зависимости интенсивности рентгено- и импульсной катодолюминесценции алюмоиттриевых композитов, легированных тербием, от концентрации тербия.

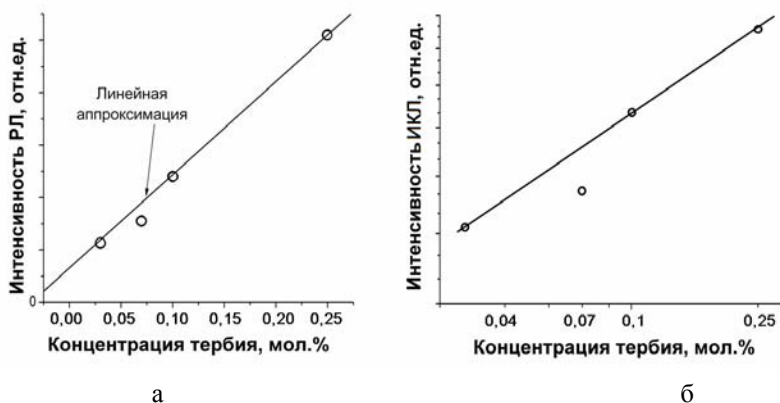


Рис. 1. Зависимость интенсивности РЛ (а) и ИКЛ (б) на длине волны 542 нм от концентрации тербия, полученные для структур ПАОА/ $YAlO_3$, сформированных из растворов с различной концентрацией тербия: 0.03, 0.07, 0.1 и 0.25 мол.% (концентрация Tb^{3+} в композите 1.3, 2.9, 4.1 и 9.6 мол.% соответственно)

Композиты формировались на пористом анодном оксиде алюминия (ПАОА) – толщина оксида 3 мкм, диаметр пор 100–120 нм, полученном на кремниевых пластинах, центрифугированием растворов на основе нитратов иттрия $Y(NO_3)_3$, алюминия $Al(NO_3)_3$, и тербия $Tb(NO_3)_3$ с про-

межфазной сушкой каждого слоя при 200 °С. После формирования 5 слоев композита образцы отжигали на воздухе при температуре 1000 °С в течение 30 мин. Мольное содержание тербия в композите по отношению к алюминию и иттрию варьировалось от 0,4 до 9,6 %. Композит формируется в порах в виде алюмоиттриевого перовскита $YAlO_3$, о чем свидетельствуют данные рентгенодифракционного анализа [1]. Для образцов зарегистрирована рентгено- (РЛ) и импульсная катодолюминесценция (ИКЛ) по методике [2]. Для двух видов возбуждения наблюдается линейный рост интенсивности люминесценции в зеленом диапазоне с увеличением концентрации тербия (Рис.1, а,б).

1. A. Podhorodecki, N.V. Gaponenko, G. Zatoryb, I.S. Molchan, M. Motyka, J. Serafinczuk, L.W. Golacki, L.S. Khoroshko, J. Misiewicz, G.E. Thompson J. Phys. D: Appl. Phys. **46** 355302 (2013).
2. N.V. Gaponenko, V.S. Kortov, N.P. Smirnova, T.I. Orekhovskaya, I.A. Nikolaenko, V.A. Pustovarov, S.V. Zvonarev, A.I. Slesarev, O.P. Linnik, M.A. Zhukovskii, V.E. Borisenko. Microelectronic Engineering **90** 131 (2012).

НАЧАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ИОНИЗАЦИИ, СОЗДАВАЕМАЯ ТЯЖЕЛЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

Хрущинский А.А.¹, Кутень С.А.¹, Бабичев Л.Ф.²

¹*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь,*

²*ГНУ «Объединенный институт ядерных и энергетических исследований –
Сосны» НАНБ, Минск, Беларусь,
kut@inp.bsu.by*

В целях непрерывного контроля мощности реактора по нейтронному потоку и для исследования характеристик нейтронного поля применяют ионизационные камеры, нейтроно-чувствительные элементы которых содержат бор, гелий или делящиеся нуклиды. В водо-водяных реакторах типа ВВЭР основным способом оперативного контроля уровня мощности является измерение нейтронного потока с использованием боковых ионизационных камер, размещенных в каналах бетонной шахты реактора. Для внутриреакторных исследований миниатюрные ионизационные камеры располагают в узких каналах в различных частях активной зоны реактора. Для этой цели обычно используют камеры деления.

Для расчета характеристик таких камер, работающих в токовом режиме или в режиме Campbelling mode, или их моделирования с помощью методов Монте-Карло необходимо знать начальную плотность ионизации $n(x)=dN/dV$ внутри рабочего объема камеры V . Эта величина входит в уравнения переноса электронов и ионов как функция источника и, следовательно, наряду с граничными условиями, определяет распределение электрического поля внутри чувствительного объема и выходные токи прибора. Несмотря на кажущуюся простоту задачи, в литературе бытует много как приближенных формул с неизвестной точностью приближения [1], так и неправильных [2]. В данной работе выведена точная формула начальной плотности ионизации для плоской и цилиндрической геометрии и приведено сравнение с другими результатами.

Для цилиндрической камеры начальная плотность ионизации определяется выражением вида:

$$n(x) = \frac{dN}{dV} = \frac{N_{fst}}{2\pi} \rho \int_{-\varphi}^{\varphi} d\varphi \int_{-z(\varphi)}^{z(\varphi)} \frac{(x \cos \varphi - \rho) X(\vec{s})}{(\rho^2 - 2\rho x \cos \varphi + x^2 + z^2)^{3/2}} dz, \quad (1)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\rho}{x}\right), \quad z(\varphi) = \sqrt{l^2 - (\rho^2 - 2\rho x \cos \varphi + x^2)},$$

где N_{fst} – поверхностная плотность излучения тяжелых частиц из радиатора в чувствительный объем камеры, $X(s)$ – плотность ионизации в треке, s – расстояние от точки старта до точки наблюдения, x – высота точки наблюдения над радиатором, l – длина свободного пробега, ρ – радиус радиатора, z – координата вдоль оси цилиндрической камеры.

1. O. Poujade, A. Lebrun, NIM A 433 673–682 (1999).
2. S. Chabod, G. Fioni, A. Letourneau, F. Marie, “Modelling of Fission Chambers in Current Mode – Analytical Approach “, NIM, A 566, 2, 633–653 (2006).

SIMULATION OF INDUCED RADIATION IN COMPONENTS OF A PROTON BEAM LINE SEGMENT PRODUCED BY PROTON BEAM LOSSES

Khrutchinsky A.A.¹, Kutsen S.A.¹, Batouritski M.A.²,
Caruso S.³, Volmert B.³

¹ *Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
Minsk, Belarus,*

² *The National Scientific and Educational Centre for Particle and
High Energy Physics of Belarusian State University, Minsk, Belarus,*

³ *National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (NAGRA),
Wettingen, Switzerland, kut@inp.bsu.by*

A simplified Fluka model of a typical proton beam line segment consisting in a sequence of quadrupole, bending and kicker magnets has been developed to determine the level of radiation caused by proton beam losses and released into the magnets and penetrating through the surrounding shielding. The shielding consists of one meter thick “heavy” concrete blocks near the beam line. An iron liner was also considered on the surface of the concrete blocks for further analysis. In simplified model all components of the segment of interest were placed along the central line of the beam tube.

A cylindrical beam with 590 MeV protons was considered for this study. The protons are emitted from the beginning to the end of the segment with a typical angular divergence of 1.7 mrad.

A calculation of the residual nuclide distribution into the magnet system (including Fe-core and core coil), the beam line and the shielding was carried out in the case of 1 year of irradiation time and different cooling times (1 month, 1, 3 and 5 years). The most volumetrically active nuclides after 1 year of cooling time are ³H, ⁴⁵Ca, ²²Na, ⁵⁵Fe and ⁵⁴Mn for the concrete and ⁵⁵Fe, ⁵⁴Mn, ⁴⁹V for the Fe-liner, given in order of importance. The simulation shows that the total induced activity in Fe-liner is about two times greater than in concrete. It may worth to mention that 1-cm thick Fe-liner reduces the total activity in concrete of 3% at most.

The total activities, the volumetric and the specific activities were also calculated for all components of the model. After 5 years of cooling time the most important radioactive nuclides are indeed ³H, ²²Na, ⁵⁵Fe, ¹⁵²Eu and ⁵⁵Fe in both concrete and Fe-liner. The total activity in concrete decreases 3.9 and 3.7 times in 5 years of decay with and without the Fe-liner, respectively. The total activity of Fe-liner itself decreases, during this period, 9 times.

The dependence between the total induced activity and the energy fluence with the cooling time was also analyzed and here reported. The concrete activation was determined as a function of the block thickness by calculation of a step-wise distribution (10 cm step) of induced activity inside the concrete depending on the presence or absence of Fe-liner.

Finally, the proton and neutron spectra before and behind the shielding were calculated and here illustrated.

ЗОННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ПАРАМЕТРЫ ТЕРМАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НАНОЧАСТИЦ LaPO_4 И LuPO_4

Чорнодольский Я.Н.¹, Вистовский В.В.¹, Сиротюк С.В.²,
Гектин А.В.³, Волошиновский А.С.¹

¹Львовский национальный университет им. И. Франко, Львов, Украина,

²Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, Украина,

³Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
chornodolsky@gmail.com

Произведен расчет электронной энергетической структуры наночастиц LaPO_4 для двух типов решеток – моноклинной и гексагональной, используя формализм PAW с учетом сильных локальных корреляций в приближении PBE0 GGA [1]. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, определенными из спектров возбуждения собственной люминесценции кристалла LaPO_4 . Разница значений ширины запрещенной зоны для этих двух симметрий наночастиц LaPO_4 достаточно хорошо коррелирует с экспериментальной, где при переходе от моноклинной к гексагональной симметрии решетки наблюдается уменьшение ширины запрещенной зоны примерно на 0,6 эВ [2]. Проведен расчет парциальной электронной плотности состояний кристалла LaPO_4 и объяснена природа различных состояний в формировании общей плотности.

Используя метод функции Грина [3], рассчитана электронная энергетическая структура наночастиц LuPO_4 . Полученное значение ширины запрещенной зоны составляет 8,95 эВ, что хорошо согласуется с экспериментальным значением – 9,18 эВ.

На основе полученных электронных энергетических структур и оптических параметров оценены средняя длина термализации фотоэлектронов и их длина свободного пробега для кристаллов LaPO_4 и LuPO_4 . Оценка этих параметров является необходимой для определения минимальных размеров наночастиц с целью их использования в качестве компонента сцинтилляционных композитов.

1. P.E. Blochl, Phys. Rev. B, **50**, 23, 17953 (1994).

2. S.V. Syrotyuk, Ya.M. Chornodolsky, V.V. Vistovsky, A.S. Voloshinovskii, A.V. Gektin. Functional Materials, **20**, 373 (2013).

3. H. Akai, Phys. Rev. Lett. **81**, 3002 (1998).

СЦИНТИЛЛЯЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ ИОДИДОВ

Ширан Н.В.

*Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, Харьков, Украина,
shiran@isc.kharkov.com*

Высокая сцинтилляционная эффективность щелочных и щёлочно-земельных галогенидов была выявлена в 60-х годах прошлого века. Для целей радиационного контроля в последнее время потребовались крупноразмерные сцинтилляторы, но с эффективностью более высокой, чем традиционные кристаллы на основе NaI и CsI. Возможность применения соединений с затянутым временем высвечивания ($\geq 1 \mu\text{sec}$) стимулировало новый виток поиска сцинтилляционных материалов и привлекло внимание к легированным европием кристаллам SrI_2 , CaI_2 , CsBa_2I_5 и BaBrI [1]. Было установлено, что их световыход может достигать рекордно высоких значений, близких к теоретически достижимому пределу. Центры свечения Eu^{2+} обладают высокой квантовой эффективностью, поэтому основной физической и технологической проблемой является обеспечение эффективного переноса энергии от решетки к центрам свечения. Высокая эффективность такого рода сцинтилляторов позволяет их применение для множества целей и, в первую очередь, для радиационного контроля.

К недостаткам щелочноземельных иодидов может быть отнесена их гигроскопичность, что осложняет технологию выращивания, обработки и упаковки больших и совершенных кристаллов. Как известно, совершенство традиционных сцинтилляторов на базе кристаллов NaI и CsI является одним из важнейших факторов их сцинтилляционной эффективности. Анализ данных об особенностях процесса переноса энергии к центрам свечения в таких иодидах как NaI, NaI:Tl, NaI:Eu, CsI:Eu [2, 3] может служить основой для выработки рекомендаций по разработке и совершенствованию гигроскопичных сцинтилляторов. При изучении сцинтилляционных характеристик кристаллов одинакового химического состава, но разного качества, было установлено, что их параметры варьируются в широком интервале и существенно зависят от наличия собственных и примесных дефектов структуры. Так квантовая эффективность и кинетика свечения, энергетическое разрешение и пропорциональность, а также радиационная стойкость кристаллов варьируются в зависимости от качества исходной шихты, условий её

обработки и технологии выращивания [2]. Абсорбционные и люминесцентные исследования показали, что наряду с полосами, характерными для базовой матрицы и активатора, проявляются дополнительные центры, вклад которых отличается от образца к образцу. Структура такого рода центров остается до сих пор невыясненной, однако установлено, что она обусловлена гигроскопичностью базовой матрицы и активирующей добавки. В данной работе представлен краткий обзор исследований критических параметров чистых и активированных сцинтилляторов, определяемых присутствием кислород- и водород содержащих примесей.

1. А. Гектин, Н. Ширан, А. Васильев, А. Бельский. Особенности получения высокоэффективных галоидных сцинтилляторов; теория и практика разработки сцинтилляторов. В кн.: Функциональные материалы для сцинтилляционной техники и медицины, Харьков, ИСМА, 2012. 428 с. С. 52–71.
2. N. Shiran, I. Boiaryntseva, A. Gektin et al. *Materials Research Bulletin* 59 (2014), 13–17.
3. A. Gektin, N. Shiran, S. Vasyukov et al. *Optical Materials* 35 (2013), 2613–2617.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ГАММА-ДЕТЕКТОР ДЛЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Шустов А.Е., Власик К.Ф., Грачев В.М., Дмитриенко В.В.,
Новиков А.С., Петренко Д.В., Смирнова М.О., Улин С.Е.,
Утешев З.М., Чернышева И.В.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия,
aeshustov@mephi.ru*

Методы диагностики и лечения рака являются актуальными проблемами медицинской физики. Одним из действенных инструментов в борьбе с онкологическими заболеваниями является лучевая терапия. Нейтрон-захватная терапия (НЗТ) – одна из разновидностей данного метода.

В докладе дано описание эксперимента и установки для проведения НЗТ с применением фармпрепарата на основе ^{10}B . Во время сеанса лучевой терапии одной из главных задач является контроль поглощенной дозы в тканях пациента. В результате ядерной реакции захвата нейтронов ядрами ^{10}B , содержащимися в фармпрепарате, возникают мгновенные гамма-кванты с энергией 478 кэВ. Для оценки поглощенной дозы применяется методика на основе регистрации мгновенных гамма-квантов. В состав установки входит сцинтилляционный гамма-детектор на основе цилиндрического кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размерами $\varnothing 25 \times 25$ мм.

Представлены оценки эффективности регистрации гамма-квантов для сцинтилляционного детектора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и антисовпадательного детектора LYSO. Приведены результаты моделирования эксперимента для оценки поглощенной дозы в водном растворе фармпрепарата.

ГАММА-ЛОКАТОР ДЛЯ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Ягнюкова А.К., Болоздыня А.И.,
Канцеров В.А., Сосновцев В.В.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия,
yagn.anastasia@gmail.com*

Гамма-локаатор – это миниатюрный детектор гамма-излучения на основе сцинтилляционного кристалла $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ и кремниевого фотомножителя, предназначенный для использования в ядерной медицине с целью определения в режиме реального времени пространственного распределения радиоактивных фармацевтических препаратов в теле человека.

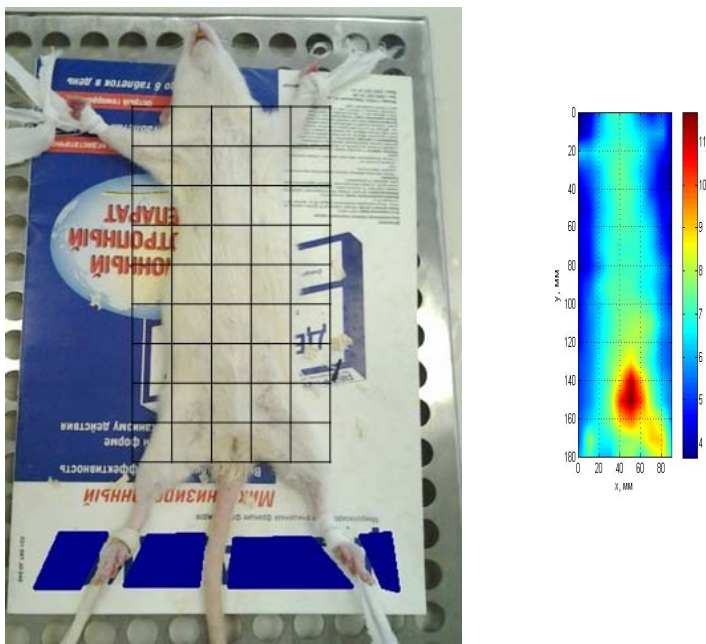


Рис.1. Восстановленное изображение распределения накопления РФП в животном

Существуют две основные области применения гамма-локатора: интраоперационный поиск «сторожевых» лимфатических узлов и неинвазивное сканирование поверхности тела пациента. В первом случае радиофармпрепарат перед операцией вводят в тело пациента, и хирург во время удаления опухоли проверяет лимфатические узлы на наличие метастаз. Во втором случае с помощью гамма-локатора обнаруживают опухоли, расположенные поверхностно, и определяют их границы с высокой точностью.

Выбор кремниевого фотоумножителя (SiPM) в качестве фотоприемника гамма-локатора обусловлен его высокой эффективностью регистрации, небольшим напряжением смещения, компактными размерами и высоким коэффициентом усиления. Экспериментальные исследования показали, что сцинтиллятор $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, упакованный совместно с SiPM в непрозрачную герметичную сборку, обеспечивает энергетическое разрешение 6,9% на линии 662 кэВ.

Гамма-локатор оснащен разъемом USB для передачи данных на персональный компьютер, однако предусмотрен режим автономной работы при использовании литий-ионного аккумулятора. Индикация данных производится при помощи акустического сигнала и цифрового дисплея.

Измерены основные технические характеристики гамма-локатора с использованием источника гамма-излучения Co-57 (126 кэВ, 133 кэВ). Пространственное разрешение – минимальное расстояние между двумя точечными источниками гамма-квантов, излучение которых может быть проанализировано по отдельности – составило 8 мм. Угловое разрешение составило 26 градусов. Чувствительность прибора составила 12 имп/с/кБк.

Гамма-локатор был испытан в режиме визуализации *in vivo* на лабораторной крысе, которой был введен радиофармпрепарат “Технефит”. Спустя три часа после введения радиофармпрепарат накопился преимущественно в мочевом пузыре, размеры которого составляют примерно 1 см, что позволило испытать прибор в условиях, близких к реальным условиям применения.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

A

Afanaciev K. · 23
Alexeev G.D. · 23
Ananenko A. · 82
Artikov A.M. · 22

B

Baranov V.Yu. · 22
Batouritski M.A. · 23, 140
Borisevich A. · 104
Budagov J.A. · 22

C

Caruso S. · 140
Cordelli M. · 22
Corradi G. · 22

D

Dane E. · 22
Davydov Yu.I. · 22
Dormenev V. · 104
Dvornikov O. · 23

E

Emeliantchik I. · 23

F

Fedorov A. · 104

G

Gektin A. · 57
Giovannella S. · 22
Glagolev V.V. · 22

H

Happacher F. · 22

I

Ivanov N.P. · 82

K

Khrutchinsky A.A. · 140

Korjik M. · 85, 104
Kovalenko N. · 82
Kozlov D. · 104
Kutsen S.A. · 140

L

Lobko A.S. · 98, 99

M

Martini M. · 22
Mechinsky V. · 104
Mikhailov V. · 23
Miscetti S. · 22

P

Pentchev L. · 34, 35
Piskun A. · 23

S

Saputi A. · 22
Sarra I. · 22
Shalyugin A.N. · 22
Shevtsov V. · 23
Simonenko A.V. · 22

T

Tarasov V.A. · 82
Tchekhovski V. · 23
Terekhov G. · 23
Tereschenko V.V. · 22
Terzin I.S. · 82
Tokmenin V. · 23

U

Usubov Z.U. · 22

V

Volmert B. · 140

Z

Zihlmann B. · 34, 35

А

Абдуллаев Х.И. · 13, 123
Ададуров А.Ф. · 73
Алексеев Г.Д. · 15
Андрющенко Л.А. · 58, 68
Аносов В. · 17
Антанович А.В. · 132
Антонов А.В. · 19, 20, 100
Антонов В.И. · 19, 20, 100
Анфимов А.В. · 21
Анфимов Н. · 17
Ахмедов Г.С. · 123
Ахмедов Ф.И. · 123

Б

Бабичев Л.Ф. · 138
Базылев С.Н. · 25
Банис Ю. · 116
Баранник С.В. · 27
Баранов В. · 28
Барт Й. · 17
Барченко А.Г. · 19, 20, 100
Батурицкий М.А. · 15, 25, 29, 30
Баумер В.Н. · 125
Беликов К.Н. · 125
Беллуччи С. · 116
Белянченко С.А. · 32
Бердников В.В. · 34, 35
Биатов М. · 28
Близнюк О.Н. · 36, 110
Блинов В. · 102
Бокова Т.Ю. · 123
Бокшиц Ю.В. · 132
Болоздыня А.И. · 145
Бондарь В.Г. · 28, 125
Бояринцева Я. · 51
Будагов Ю. · 28
Быстров Е.В. · 19, 20

В

Васильев Д.А. · 38

Васильева Н.В. · 38
Васин А.А. · 40, 80
Веренич К.А. · 42, 43
Верещагина Н. · 45
Вистовский В.В. · 141
Власик К.Ф. · 144
Войтович А.П. · 47
Волков В.Г. · 49, 121
Волошина О. · 51
Волошиновский А.С. · 141
Воронин К.А. · 40
Воронов В.В. · 38

Г

Галенин Е. · 28, 53
Галкин С.Н. · 55
Галунов Н.З. · 56
Гапоненко Н.В. · 136
Гектин А.В. · 53, 141
Герасимов Я. · 28
Глаголев В. · 28
Горбачева Т.Е. · 58, 59
Грачев В.М. · 144
Гринёв Б.В. · 121, 125
Гриппа А.Ю. · 59
Гроздов Д.С. · 60
Гузов В.Д. · 74, 75, 100
Гуринович В.И. · 20
Гуськов А. · 17

Д

Давыдов Ю. · 28
Даниленко В.Н. · 62
Данилкин М. · 45, 63
Данилюк А.Л. · 94
Дворников О.В. · 15, 25, 29, 65
Демин А.В. · 27, 67
Демина Н.С. · 62
Дзиевицки М. · 17
Дмитриенко В.В. · 144
Дубцов И.Н. · 68
Дудчик Ю.И. · 69

Дятлов В.Л. · 65

Е

Елисеев Д.А. · 73

Ершов А.Е. · 40

Ж

Жежер В.Н. · 123

Жембицки М. · 17

Жмурин П.Н. · 71, 73

Жуковский А.И. · 43, 74, 75

З

Заремба К. · 17

Зверев Е.Ю. · 29

Зверева В.С. · 55

Зеленская О.В. · 125

Зубов А. · 45

И

Иванов А. · 51

Иванов А.И. · 76

Иевлев С.М. · 77

Ильевский В.А. · 32

К

Казимиров А.С. · 77

Казиминова Г.Ф. · 77

Казючиц В.Н. · 78

Казючиц Н.М. · 78

Калинов В.С. · 47

Камнев И.И. · 107

Канцеров В.А. · 145

Караваева Н.Л. · 56, 96

Каталдо А. · 116

Катрунов К.А. · 125

Кедров В.В. · 40, 80, 118

Керикмяэ М. · 45, 63

Кичанов С.Е. · 132

Классен Н.В. · 40, 80, 118

Клейн Ф. · 17

Клещев Н.Ф. · 110

Коваленко Н.О. · 86

Ковальский Е.А. · 62

Кожемякин В.А. · 19, 20, 74, 75,
84, 100

Козлов Д.М. · 134, 135

Колбасин В.А. · 27

Колотов В.П. · 60

Коржик М.В. · 47, 132, 134, 135

Кортов · 136

Космына М.Б. · 86

Кофман О.И. · 67

Кратько А. · 102

Кремер А.В. · 88, 90

Кресло И.Е. · 92

Креч А.В. · 56

Крук С.В. · 74

Крумштейн А.В. · 21

Крумштейн З. · 17

Кувыкин И.В. · 62

Кужир П.П. · 116

Курцев Д.А. · 125

Курята Р. · 17

Кутень С.А. · 42, 43, 75, 138

Кутний В.Е. · 86

Кухарев А.В. · 94

Кушнир Ю.А. · 88, 90

Л

Лаврухин Ю.Е. · 60

Лазарев И.В. · 56, 96

Лалаянц А.И. · 55

Лебедев В.Н. · 73

Левчук Л.Г. · 56

Леоненко А.А. · 88, 90

Леоненко Д.А. · 88, 90

Лещенко Ю.И. · 88, 90

Литомин А.В. · 30

Лобко А.С. · 134, 135

Лубсандорджиев Б.К. · 32

Лукашевич Р.В. · 19, 20, 100

Луст А. · 45, 63

М

Мадьяров А. · 102
Мажец Я. · 17
Макаренко Л.Ф. · 78
Малашкевич Г.Е. · 132
Малков А.П. · 88, 90
Мартынюк Л.Б. · 77
Марясевская А.В. · 40
Масалитина Н.Ю. · 36
Маслов В. · 53
Маслов Д. · 53
Махота С.В. · 121
Мацуткевич Я. · 116
Миненко В.Ф. · 42, 43
Михайлов В.А. · 15, 25, 29
Мицциулла Ф. · 116
Мусяенко Ю.В. · 134
Мухтаров Р.М. · 13, 123

Н

Нагайцев А. · 17
Наумчик Е.В. · 78
Немченко И.Б. · 106, 107
Ничипорчук А.О. · 75
Новиков А.Н. · 47
Новиков А.С. · 144
Новосад И.С. · 108
Новосад С.С. · 108
Ноздрин А.А. · 21

О

Огурцов А.Н. · 36, 110
Олих Я.М. · 112
Ольшевский А.Г. · 17, 21, 114
Ополонин А.Д. · 121
Орлов И. · 17

П

Педаш В.Ю. · 59, 115
Переймак В.Н. · 73
Петренко Д.В. · 144
Плотниченко В.Г. · 38

Плющ А.О. · 116
Покидов А.П. · 80, 118
Пономаренко Р.А. · 62
Попкова Е.В. · 121
Попов В.Ф. · 56
Применко А. · 63
Пустоваров В.А. · 136

Р

Реброва Н.В. · 59
Рихтер А. · 17
Рогожин А.А. · 120
Романовский В.С. · 88, 90
Романчук В. · 53
Рунец Л.П. · 47
Русецкий М.С. · 78
Рыбалка И.А. · 55
Рыбка А.В. · 86
Рыбников А.В. · 17, 21
Рыжиков В.Д. · 121
Рыкалин В.И. · 32

С

Садыгов А.З. · 123
Садыгов З.Я. · 123
Сафронов И.В. · 126
Селюнин А.С. · 17, 21
Семан В. · 45
Сенягин Ю.Ю. · 67
Сиделев А.В. · 123
Сидлецкий О. · 28, 51, 124, 125
Сиротюк С.В. · 141
Скубо Ю.В. · 62
Славин Г. · 63
Смирнов Н. · 53
Смирнова М.О. · 144
Соколов В.О. · 38
Солин А.А. · 15
Солин А.В. · 15
Соловьева С.Л. · 62
Сомов А.С. · 130
Сомов С.В. · 34, 35, 130

Сорокин П.В. · 56
Сосновцев В.В. · 145
Спасский Д.А. · 38, 51
Стадник П. · 53
Ступак А.П. · 47
Суворов Д.А. · 62
Сулима С.В. · 86
Сытов А.И. · 126

Т

Тарасенко О.А. · 96, 125
Тарасов В.А. · 58, 59, 68, 96, 125
Теллин А.И. · 88, 90
Терехов Г.С. · 15, 25, 29, 30
Терзин И.С. · 86
Терлецкий А.В. · 25
Тимочко Н.Д. · 112
Титов А.И. · 123
Тихомиров В.В. · 128
Тицкая В.Д. · 73
Толстухин И.А. · 130
Третьяк Е.В. · 132
Трефилова Л.Н. · 68

У

Улин С.Е. · 144
Утешев З.М. · 144

Ф

Федоров А.А. · 134, 135
Федоровский С.Ю. · 62
Федосеев Д.В. · 21
Фоков Г.А. · 100
Фролов В. · 17
Фроммбергер Ф. · 17
Фурсова Т.Н. · 118

Х

Хабусева С.У. · 56
Хахалин А.В. · 38
Хиллерт В. · 17
Хорошко Л.С. · 136
Хрущинский А.А. · 42, 43, 75, 138

Ц

Цой Е. · 53

Ч

Чалышев В. · 17
Чергинец В.Л. · 59
Чередилова А.А. · 107
Черный Е.В. · 77
Чернышева И.В. · 144
Чеховский В.А. · 65
Чирикало В.А. · 74
Чириков-Зорин И. · 17
Чичин А.С. · 25, 29
Чернодольский Я.Н. · 141

Ш

Шевченко Г.П. · 132
Ширан Н.В. · 142
Шмурак С.З. · 80
Шмытько И.М. · 40, 80, 118
Шпилинская О.Л. · 68
Шустов А.Е. · 144

Э

Элснер Д. · 17

Я

Ягнюкова А.К. · 145

Научное издание

Четвертая международная конференция
ИНЖЕНЕРИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И
РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ИСМАРТ 2014

Тезисы

12 – 16 октября 2014 года

Редактор М. В. Коржик
Компьютерная верстка С. Н. Сытовой