

ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ НЕЙТРОННЫХ ПОЛЕЙ

П.Б. Басков*, Г.В. Маричев, В.В.Сахаров*, В.А.Степанов**,*****

* *ОАО Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 33*

** *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249030, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1.*

*** *ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области
физики, химии и биологии при Президиуме РАН
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, с. 6*



При создании ядерно-оптических преобразователей (ЯОП) для детектирования сильных (потоки свыше $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) нейтронных полей предлагаются гибридные газовые ионизационные камеры (ИК), в которых сочетаются электрические и оптические способы регистрации нейтронов. Для гибридных ИК предлагается технология получения радиационно стойких и механически прочных радиаторных материалов, пригодных к эксплуатации при температурах до 1000°C . Эта технология основана на твердофазном диффузионном насыщении бором сталей. Показано, что при плотностях потока тепловых нейтронов от $1 \cdot 10^{10} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ интегральная интенсивность свечения аргона при ионизации α -частицами и ионами ${}^7\text{Li}$ из слоев фаз боридов достаточна для регистрации.

Совокупность оптических и радиационных свойств многокомпонентных фторидных стекол позволяет использовать их в качестве конденсированных рабочих сред ЯОП. Выбор элементного и изотопного состава позволяет использовать фторидные стекла для многоканального детектирования нейтронов, значительно упростить процедуру разделения гамма- и нейтронного компонентов радиации в условиях интенсивных радиационных потоков. Экспериментально показано увеличение интенсивности ИК-люминесценции Nd в стеклах на основе фторида циркония ZBLAN при введении активной к нейтронам примеси Gd при облучении потоком до $1 \cdot 10^{17} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$.

Ключевые слова: детекторы нейтронов, гамма-детекторы, ядерно-оптический преобразователь, ионизационная камера, сцинтиллятор, фторидное стекло, сильное нейтронное поле.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость совершенствования имеющихся и создания новых нейтронных детекторов связана с изменяющимися условиями работы радиационных устройств. Так, в активной зоне реактора уже достигаются температуры до 700°C , потоки нейтронов до

© П.Б. Басков, Г.В. Маричев, В.В.Сахаров, В.А.Степанов, 2021

$1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, мощности гамма-дозы до $1 \cdot 10^2 \text{ Гр/с}$ и вибрации до 200 Гц. Для обеспечения нейтронной диагностики на реакторах с такими характеристиками необходимо расширение возможностей датчиков нейтронов на электрическом принципе работы за счет комбинаций с радиационно-люминесцентным детектированием или за счет полного перехода к системам радиационной фотоники. В системах радиационной фотоники можно достигать минимальных шумов при высоких температурах при сохранении пропорционального детектирования интенсивных радиационных потоков.

Развитие оптики детектирования нейтронов связано с созданием ядерно-оптического преобразователя (ЯОП), который предназначен для обеспечения автономного канала нейтронного контроля. Основными функциональными элементами ЯОП являются

- радиатор из материала, содержащего элементы, которые конвертируют нейтронный поток в поток высокоэнергетических продуктов ядерных реакций;
- рабочая среда, в которой высокоэнергетические ионы вызывают возбуждения с последующей релаксацией и испусканием фотонного потока (смесь инертных газов или конденсированные сцинтилляторы);
- волоконно-оптический транслятор, который обеспечивает передачу фотонного сигнала на регистрирующую расположенную вне реакторной зоны аппаратуру.

Разработки каждого элемента ЯОП представляют собой еще не решенные задачи. Варианты технологических решений по структурной организации на микро- и нано-масштабе волоконно-оптических трансляторов ЯОП с необходимой эксплуатационной прочностью при экстремальных внешних воздействиях можно найти в работах [1, 2]. В нашей работе рассматриваются подходы к выбору и получению радиаторов для гибридных ионизационных камер (ИК), в которых сочетаются электрические и оптические способы регистрации нейтронов, а также подходы к выбору конденсированных рабочих сред детекторов с необходимой чувствительностью и селективностью детектирования в сильных (потоки свыше $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) нейтронных полях. С учётом специфики применения радиаторов и рабочих материалов детекторов важнейшей проблемой при их разработке становится повышение долговечности за счет радиационной стойкости, механической прочности и оптической прозрачности при интенсивном облучении.

ГИБРИДНЫЕ КАМЕРЫ

В настоящее время в системах управления и защиты эксплуатируемых реакторов для нейтронной диагностики используются ^3He -газоразрядные счетчики и ИК с использованием изотопов ^{235}U , ^{232}Th , ^{10}B , принцип действия которых был разработан еще в 70-х годах прошлого столетия. ИК представляет собой заполненный газом герметичный сосуд с двумя электродами, к которым приложена разность электрических потенциалов. В качестве радиатора ИК используют материалы, содержащие взаимодействующие с нейтронами изотопы. В результате реакций с нейтронами происходит ионизация рабочего газа продуктами ядерных превращений, а заряд ионизации попадает на электроды камеры и передается во внешнюю электрическую цепь [3].

Система детектирования на основе технологий радиационной фотоники, но с использованием широко применяемых камер деления для детектирования, разрабатывается в гибридной камере [4]. Схема гибридной системы детектирования нейтронных и гамма-потоков показана на рис. 1.

В такой системе помимо электрических сигналов традиционной ИК регистрируются также сопровождающие ядерные реакции вспышки или свечение рабочего газа, что повышает надежность регистрации и расширяет диапазон потоков регистрируемых нейтронов. Волоконный световод используется как канал для передачи оптических сигналов сцинтилляций рабочего газа камеры деления. В гибридной камере деления необходимо решать проблему радиационной и температурной стойкости составляющих

функциональных элементов, а также их сочленения в единый чувствительный элемент. Задача термомеханической устойчивости радиаторов решается с помощью создания устойчивого содержащего бор покрытия на нержавеющей стали.

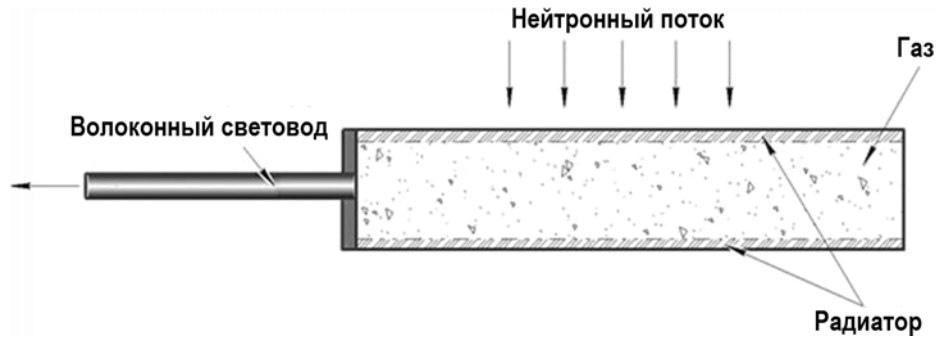


Рис. 1. Схема гибридной камеры деления на основе одно- и многокомпонентных радиаторов (оксиды ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^6Li , ^{10}B и др.) с волоконно-оптическим радиационно стойким выводом фотонного сигнала

Природный бор состоит из двух стабильных изотопов – ^{10}B (19,57 %) и ^{11}B (80,43%). Характеристики взаимодействия стабильных изотопов бора с тепловыми нейтронами представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики взаимодействия стабильных изотопов бора с тепловыми нейтронами [5]

Изотоп	% содержания в природном материале	Сечение (n, α)-реакции при 0,025 эВ, барн	Сечение (n, γ)-реакции при 0,025 эВ, барн	Реакция взаимодействия с нейтронами
^{10}B	19,57	3840	0,5	1) $^{10}\text{B}(n, \alpha) \rightarrow \text{Li}^7 + \alpha + 2,31$ 2) $^{10}\text{B}(n, \alpha) \rightarrow \text{Li}^7 + \alpha + 2,79$ 3) $^{10}\text{B}(n, \gamma) \rightarrow ^{11}\text{B}$
^{11}B	80,43	0,005	$50 \cdot 10^{-3}$	$^{11}\text{B}(n, \gamma) \rightarrow ^{12}\text{B}$ ($T_{1/2} = 0,019$ с)

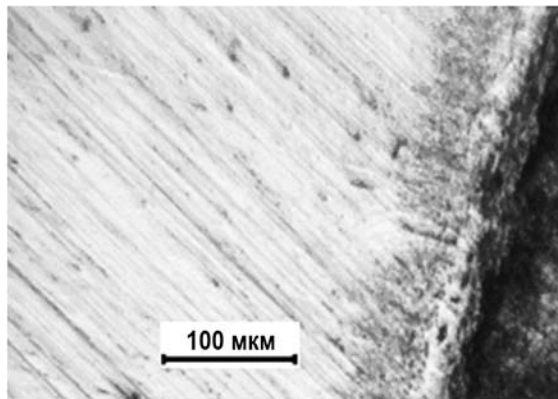


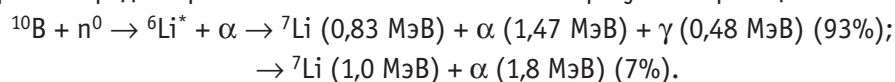
Рис. 2. Микроструктура поперечного шлифа образца радиатора из 12Х18Н10Т после процесса борирования

В отличие от используемых в радиаторах изотопов урана, тория, лития бор наряду с большим сечением поглощения тепловых нейтронов образует соединения с высокой радиационной и термостойкостью. Известно, что поверхностное борирование, например, железа, чугуна и стали приводит к покрытиям с образованием боридов железа с высокой поверхностной твердостью, износостойкостью, жаростойкостью и коррозионной

стойкостью [6]. Для разработки радиаторов ИК можно использовать процесс диффузионного насыщения поверхности металла бором с образованием боридов железа Fe₂B и FeB. Процесс проводят в смеси борсодержащих порошков, паст, газов или в расплаве солей [7,8].

В нашей работе в качестве основы была выбрана сталь 12X18H10T для насыщения из пасты состава 84% В₄С+16% Na₂В₄О₇ и клея БФ-4 в ацетоне. Насыщение происходило при 1000 °С с защитным слоем состава 50%В₂О₃+50%SiО₂. С помощью рентгенофазового анализа показано, что такая химико-термическая обработка приводит к образованию на поверхности сплошного слоя боридов Fe₂B и FeB. Микроструктура поперечного шлифа образца радиатора показана на рис. 2. На поверхности виден боридный слой глубиной до 50 мкм. Микротвёрдость этого слоя составляла 9,1 ГПа по сравнению с исходным для стали значением 2,2 ГПа.

Для оценки эффективности такого радиатора положим, что, в соответствии с табл. 1, с поверхности радиатора вылетают ионы лития и гелия в результате реакций



Доля ионов $f(x)$, вылетающих в газ с глубины x от поверхности электрода

$$f(x) = 1/[2(1 - x/R)],$$

и при толщине покрытия s больше длины пробега ионов R получается полная доля вылетающих в газ ионов

$$f = \frac{\int_0^R f(x)dx}{s} = \frac{R}{4s}.$$

Результаты расчётов потоков ионов He и Li из борированных слоев стали приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчётов потоков ионов из фаз боридов

Фаза	ρ , г/см ³	Коэффициент поглощения нейтронов, см ⁻¹	α (1,47 МэВ)			⁷ Li (0,87 МэВ)		
			Пробег R, мкм	f	Поток q , 10 ¹⁰ ион/(см ² с)	Пробег R, мкм	f	Поток q , 10 ¹⁰ ион/(см ² с)
FeB	5,1080	34,64	2,96	0,1850	6,41	1,82	0,1138	3,94
Fe ₂ B	6,0273	22,24	2,71	0,1694	3,77	1,39	0,0869	1,93

Таблица 3

Результаты расчётов интенсивности свечения аргона гибридной камеры при облучении тепловыми нейтронами 1·10¹⁰ н/см²с

Ион	FeB			Fe ₂ B		
	$E_{\text{ср}}$, МэВ	Поток энергии ионов, 10 ¹⁰ МэВ/(см ² с)	Интенсивность свечения I , мВт/см ²	$E_{\text{ср}}$, МэВ	Поток энергии ионов, 10 ¹⁰ МэВ/(см ² с)	Интенсивность свечения I , мВт/см ²
α	0,818	5,243	0,251	0,752	2,835	0,136
⁷ Li	0,492	1,938	0,093	0,195	0,376	0,018

В качестве рабочей среды гибридной камеры наиболее подходит аргон. Это связано с тем, что дуговой и искровой спектры аргона состоят из многих линий (около 900),

расположенных в спектральной области между 400 и 706 нм [9, 10]. Согласно [11], спектр излучения искрового разряда аргона характеризуется интенсивным линейчатым и рекомбинационным излучением с длительностью вспышек до $1 \cdot 10^{-8}$ с в диапазоне длин волн 200 – 600 нм. Свечение аргона попадает в диапазон прозрачности в красной и б-ИК-области кварцевых волоконно-оптических трансляторов даже при значительных радиационных воздействиях. Оценки свечения гибридной камеры при облучении тепловыми нейтронами с учетом конверсионной эффективности аргона 0,03 приведены в табл. 3.

Интенсивность свечения в полный телесный угол составит до 0,3 мВт. Даже при неизбежных потерях в гибридной камере при улавливании излучения в волокно такая интенсивность позволит уверенно регистрировать нейтронный поток, начиная с $1 \cdot 10^{10}$ н/см²с.

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ СТЕКЛА

Конденсированные сцинтилляторы в качестве рабочей среды ЯОП давно исследуются [12]. В отличие от газа, который не чувствителен к гамма-облучению, твердотельные детекторы на основе неорганических кристаллов, стекол и органических пластических сцинтилляторов можно использовать для регистрации как нейтронов, так и гамма-квантов. Ионизация гамма-излучением происходит в результате фотоэффекта для энергий квантов менее 0,5 МэВ, комптоновского рассеяния или рождения электрон-позитронных пар для энергий более 1 МэВ. При взаимодействиях нейтронов происходят либо выбивание ионов, либо ядерные реакции, продукты которых также ионизируют среду.

Таблица 4

Характеристики некоторых материалов, применяемых в сцинтилляционных счётчиках

Вещество	Плотность, г/см ³	Время высвечивания, 10 ⁻⁹ с	Длина волны в максимуме спектра, нм	Конверсионная эффективность, % (для электронов)
Антрацен C ₁₄ H ₁₀	1,25	30	445	4
Стильбен C ₁₄ H ₁₂	1,16	6	410	3
NaI (TI)	3,67	250	410	6
ZnS (Ag)	4,09	11	450	10
CsI (TI)	4,5	700	560	2
CaF ₂ (Eu)	3,18	940	435	3
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7,13	350	480	0,6
CdWO ₄	7,90	1000	530	1,2
Стекло SiO ₂ (Ce)-Li	2,2	200	480	5
HBLAN (Ce)	6	25	320	~1

В таблице 4 приведены характеристики наиболее распространенных сцинтилляторов. При регистрации гамма-излучения преимущественно используют материалы с высокой плотностью для обеспечения большего поглощения – это неорганические кристаллы NaI, CsI, BGO и др. При регистрации нейтронов используют органические водородосодержащие сцинтилляторы, например, антрацен и стильбен, в которых выбиваемые нейтронами протоны ионизируют среду. В литийсодержащем кварцевом стекле поглощение тепловых нейтронов происходит при взаимодействиях с изотопом ⁶Li. Образуются энергичные альфа-частицы и тритий, которые ионизируют среду и возбуждают сцинтиллирующую примесь Ce³⁺ [13]. Стекла на основе фторидов металлов могут служить детекторами как гамма-квантов, в силу их высокой плотности, так и нейтронов благодаря вы-

сокому сечению захвата нейтронов ядрами входящих в состав элементов. Например, стекла с фторидом гафния и примесью церия (HBLAN в табл. 4) с неплохой конверсионной эффективностью были предложены для детектирования рентгеновского и гамма-излучения в 1996 г. [14].

При одновременном детектировании гамма- и нейтронного компонентов разделение оптических сцинтилляций, вызванных нейтронами и гамма-квантами, происходит в результате статистической обработки амплитуд и временных характеристик отдельных сцинтилляций. Они отличаются при взаимодействиях гамма-квантов и нейтронов с материалом [12]. Поэтому важнейшими характеристиками материалов детекторов являются конверсионная эффективность – отношение энергии светового излучения к поглощенной энергии радиации, а также время высвечивания, от которого зависит степень искажения импульсов ионизации материала.

Такой метод детектирования часто приводит к значительным погрешностям, особенно в сильных нейтронных полях при потоках свыше $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Во-первых, для реализации статистического анализа сцинтилляций во избежание наложений сигналов характерные времена высвечивания не должны превышать единиц – десятков наносекунд. Но в интенсивных радиационных полях отдельные даже короткие сцинтилляции сливаются в сплошной фон, что вообще исключает возможность исследования их формы и длительности. Во-вторых, в материалах короткие сцинтилляции оптически активных примесей оказываются в видимом и УФ-диапазонах, в которых происходит существенная оптическая деградация самих материалов с ростом дозы радиационного облучения [15].

Перечисленные проблемы преодолеваются при использовании многокомпонентных стекол и отказе от метода счета и анализа отдельных сцинтилляций от радиационных потоков [16]. Например, фторидные стекла допускают широкие вариации элементного состава по взаимодействующим с нейтронами компонентам и люминесцирующим примесям. Это позволяет использовать их для одновременного детектирования гамма-квантов и нейтронов путём измерений и сравнений интегральных интенсивностей свечения. Возникает также возможность оптических измерений в ИК-области путем подбора люминесцирующей примеси для уменьшения радиационно-наведенных оптических потерь и перехода к детектированию сильных потоков.

Для использования фторидных стекол в качестве рабочей среды ЯОП были исследованы стекла на основе фторидов гафния и циркония [17]:



Ядра элементов гафния и циркония сильно отличаются по сечению взаимодействия с нейтронами, но стекла на их основе одинаковы по оптическим свойствам. На рисунке 3 показаны спектры поглощения гамма-излучения наиболее распространенного детектора из NaI и рассчитанные нами спектры фторидных стекол. В наиболее интересной области порядка 1 МэВ стекла оказываются не хуже, а гафнатное стекло даже лучше по поглощению гамма-излучения, чем кристаллы NaI.

При ионизирующем облучении фторидные стекла люминесцируют в УФ- и видимой областях спектра (рис. 4) без добавок сцинтиллирующих примесей [18]. Спектры фторидных стекол характеризуются серией узких линий в диапазоне 300 – 400 нм. Такие линии в УФ-области спектра связаны с остоно-валентной сверхбыстрой люминесценцией или кросслюминесценцией. Механизм кросслюминесценции заключается в том, что при выбивании электронов с внутренних уровней переходы из валентной зоны на свободные места внутренних остовных оболочек сопровождаются излучением света, а не выходом Оже-электронов [19]. Кросслюминесценция фторидных стекол по интенсивности значительно меньше примесной, но протекает на временах до 50 нс и

не зависит от дозы облучения до 1 МГр.



Рис. 3. Спектры поглощения гамма-излучения материалов детекторов

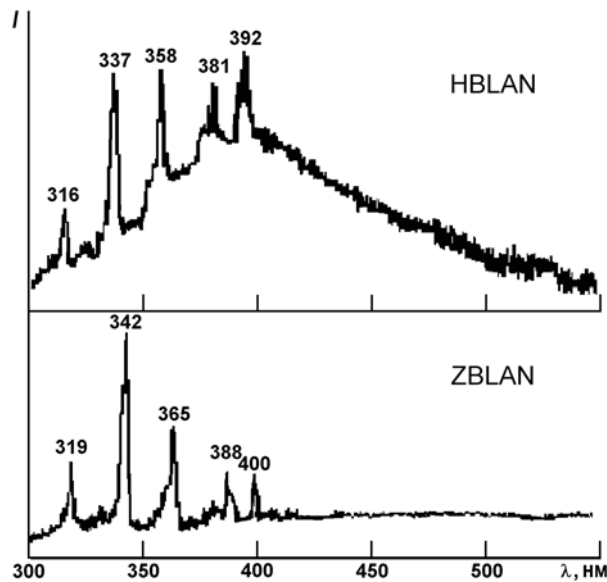


Рис. 4. Спектры люминесценции стекол на основе фторида гафния (HBLAN) и фторида циркония (ZBLAN) в процессе облучения протонами с энергией 8 МэВ

Фторидные стекла в условиях радиационных воздействий прозрачны в более широком диапазоне длин волн, чем кристаллы и стекла на других основах. Облученные фторидные стекла восстанавливают свои оптические свойства в процессе фотоотжига. Фотовосстановление оптических свойств гамма-облученных фторидных стекол эффективно протекает при интенсивностях света всего 1 мВт/см^2 [20].

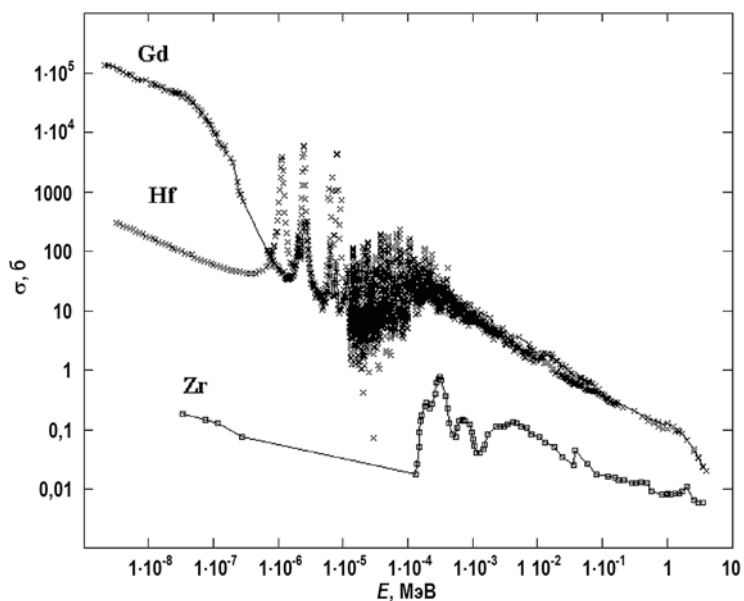


Рис. 5. Зависимости сечений реакции нейтронного захвата элементов от энергии нейтронов [21]

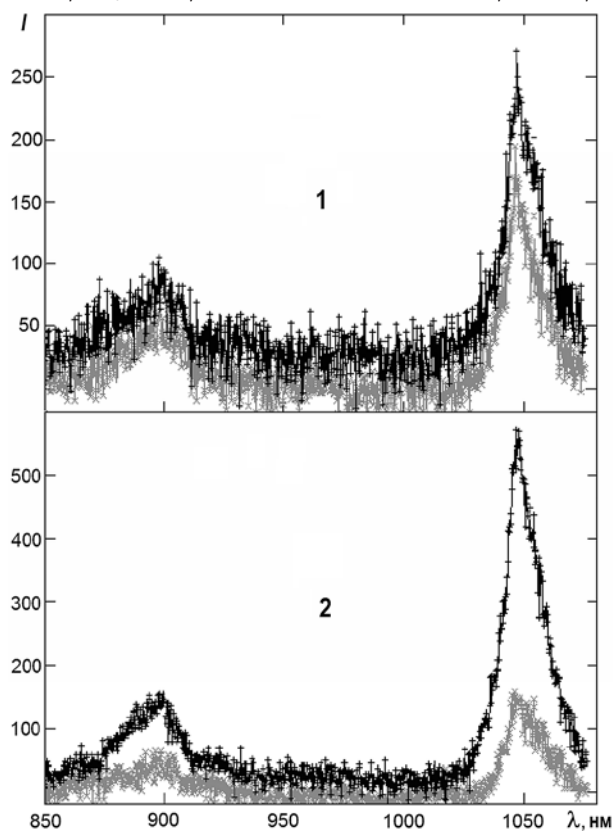


Рис. 6. Спектры оптических сигналов в стеклах ZBLAN(Nd) – серый и ZBLAN(Nd,Gd) – чёрный при импульсном реакторном облучении: 1 – быстрый спектр; 2 – смягчённый спектр нейтронов

При подборе элементного состава для детектирования радиационных потоков в качестве взаимодействующих с нейтронами компонентов стекла можно выбирать изотопы с высоким сечением реакции (n, α) – ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ или высокой вероятностью реак-

ции радиационного захвата (n, γ) – Hf, Cd, Gd, I и др. При радиационном захвате происходит почти мгновенное выделение энергии около 7,5 МэВ в виде гамма излучения, которое поглощается и ионизирует стекло. На рисунке 5 показаны зависимости нейтронных сечений для ядер Zr, Hf и Gd. Видно, что различия в сечениях достигают порядков величин. Поэтому, сравнивая радиационно-индуцированное свечение различных стекол, содержащих эти элементы, можно судить о количестве тепловых, промежуточных и даже быстрых нейтронов в радиационном потоке. Возникает также возможность многоканального детектирования, при котором разделение n - и γ -компонентов радиации осуществляют путем сравнения интегральных интенсивностей свечения различных по составу стекол.

На рисунке 6 приведены спектры свечения стекол ZBLAN с примесью Nd при импульсном реакторном облучении (импульс 80 мкс, доза за импульс до $5 \cdot 10^{12}$ нейтрон/см² ($E > 1$ кэВ), доза по гамма-квантам 9 Гр). В одно из стекол введена примесь с высоким сечением взаимодействия с нейтронами – Gd. Передача оптического сигнала от стекол осуществлялась по радиационно стойким кварцевым волокнам КУ-1. Измерения проводили, располагая элементы ЯОП непосредственно вблизи активных зон, а также в полиэтиленовой емкости для смягчения спектра нейтронов.

Спектры свечения ЯОП являются спектрами люминесценции Nd с полосой с максимумом 900 нм и узкой линией при 1050 нм. Свечение от элемента ZBLAN(Nd) связано только с гамма-излучением реактора. В интенсивность люминесценции ZBLAN(Nd,Gd) вносит вклад также нейтронная компонента радиационного поля. Это хорошо видно при сравнении интенсивностей свечения стекол с Gd и без него, а также при облучении быстрыми и тепловыми нейтронами, для которых сечение реакции (n, γ) Gd отличается на порядки (см. рис. 5). При смягчении спектра нейтронов увеличивается интенсивность свечения только элемента ZBLAN(Nd,Gd), в то время как свечение ZBLAN(Nd) не меняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании ЯОП для детектирования сильных (потоки свыше $1 \cdot 10^{15}$ см⁻²·с⁻¹) нейтронных полей предлагаются гибридные газовые ИК, в которых сочетаются электрические и оптические способы регистрации нейтронов. Для гибридных ИК предлагается технология получения радиационно стойких радиаторных материалов, пригодных к эксплуатации при температурах до 1000°C. В результате твердофазного диффузионного насыщения бором стали 12X18H10T можно получать радиаторы ИК со слоями фаз FeB и Fe₂B толщиной до 50 мкм с микротвердостью до 9,1 ГПа. Показано, что при плотности потока тепловых нейтронов $1 \cdot 10^{10}$ н/см²·с интегральная интенсивность свечения аргона от ионизации α -частицами и ионами ⁷Li из слоев фазы FeB составляет 0,35 мВт/см², а из слоев фазы Fe₂B – 0,15 мВт/см².

Совокупность оптических и радиационных свойств многокомпонентных фторидных стекол позволяет использовать их в качестве конденсированных рабочих сред ЯОП и в интегральных датчиках нейтронных и гамма-потоков. Значительные вариации элементного и изотопного состава можно использовать для повышения чувствительности к нейтронной и гамма-компонентам интенсивных радиационных потоков и оптимизации конверсионной эффективности стекол. Экспериментально показано увеличение интенсивности люминесценции Nd (900 и 1050 нм) в стеклах ZBLAN с добавкой активной к нейтронам примеси Gd при облучении нейтронами $1 \cdot 10^{17}$ н/(см²·с) и гамма-квантами $1 \cdot 10^5$ Гр/с. При смягчении спектра нейтронов увеличивается интенсивность люминесценции стекла ZBLAN с Gd за счёт увеличения сечения взаимодействия с нейтронами.

Литература

1. Сахаров В.В., Басков П.Б., Берикашвили В.Ш., Ивкина О.В., Косов Д.Е., Мосягина И.В., Фролов Н.Н., Шарипова М.А. Оксидная наноразмерная модификация поверхности неорганических материалов. // Наноинженерия. – 2011. – № 6. – С. 15-25.
2. Сахаров В.В., Мосягина И.В., Басков П.Б., Степанов В.А. Физико-материаловедческая комбинаторика пленочно-стекловолоконных материалов для радиационно-люминесцентного детектирования нейтронных потоков. // Вопросы радиационной безопасности. – 2016. – № 2 (82). – С. 55-63.
3. Малышев Е.К., Засадыч Ю.Б., Стабровский С.А. Газоразрядные детекторы для контроля ядерных реакторов. – М.: Энерготомиздат, 1991. – 160 с.
4. Басков П.Б., Маричев Г.В., Сахаров В.В., Степанов В.А. Гибридные камеры для детектирования нейтронных полей. / Материалы XIV Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий» под общ. ред. акад. Б.Ф. Мясоедова. – М.: МЦАИ РАН, 2019. – С. 332-336.
5. Потапов С.П. О применении стабильных изотопов бора. // Атомная энергия. – 1961. – Т. 10. – Вып. 3. – С. 244-252.
6. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
7. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов: Учебное пособие-справочник. – 2-е изд. – К.: Профессионал, 2006. – 352 с.
8. Ворошин Л. Борирование промышленных сталей и чугунов: (Справ. пособие). – Мн.: Беларусь, 1981. – 205 с.
9. Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С. Таблицы спектральных линий. – М.: Атомиздат, 1966. – 900 с.
10. Физические величины: Справочник. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
11. Омаров О.А., Омарова Н.О., Омарова П.Х., Рамазанова А.А., Аль-Харети Ф.М.А., Хачалов М.Б. Спектроскопия плазмы искрового пробоя газов в сильных магнитных полях. // Инженерная физика. – 2013. – № 5. – С. 50-58.
12. Егоров Ю.А. Сцинтилляционный метод спектрометрии гамма излучения и быстрых нейтронов. – М.: Госатомиздат, 1963. – 306 с.
13. Patent USA 5680423 (Oct. 1997) Perkins, et al. (class USA 376/153).
14. Hobson P.R., et al. Dense, Fast, Radiation-Tolerant Fluoro-Hafnate Glass Scintillators for Electromagnetic Calorimeters in High Energy Physics. / Proc. of the Int. Conf. on Inorganic scintillators and their applications (SCINT95). – Delft University Press (Netherlands), 1996. – PP. 317-324.
15. Stepanov V.A., Baskov P.B., Chernov V.M., Fedorov V.D., Khorozova O.D., Kurdyavko P.V., Sakharov V.V., Stepanov P.A. Fluoride Glasses as Materials for Radiation Optics. / Proc. of the XIII-th Int. Symposium on Non-Oxide Glasses and New Optical Glasses. Pardubice, Czech Republic, 2002. Part II. – PP. 674-677.
16. Басков П.Б., Сахаров В.В., Степанов В.А. Многокомпонентные фторидные стекла для детектирования радиационных полей. // Вопросы радиационной безопасности. – 2015. – № 3. – С. 115-120.
17. Сахаров В.В., Басков П.Б., Степанов В.А., Степанов П.А., Федоров В.Д. Бескислородные оптические материалы для радиационной оптики // ВАИТ. Сер. Материаловедение и новые материалы. – 2004. – Вып. 1 (62). – С. 231-244.
18. Baskov P.B., Kurdyavko P.V., Plaksin O.A., Sakharov V.V., Stepanov V.A., Stepanov P.A. Radioluminescence of fluoride glasses. / Proc. of the XIII-th Int. Symposium on Non-Oxide Glasses and New Optical Glasses. Pardubice, Czech Republic, 2002. Part II. – PP. 534-536.
19. Makhov V.N., Kamenskikh I.A., Terekhin M.A. et al. / Proc. of the Int. Conf. on Inorganic Scintillators and Their Application (SCINT95), 1995. – PP. 208-211.
20. Baskov P.B., Sakharov V.V., Stepanov V.A., Stepanov P.A., Kurdyavko P.V.

Photoinduced Recovery of Gamma-Irradiated Fluoride Glasses. // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28. – Iss. 9. – PP. 790-791. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1511787>.

21. *McLane V.* EXFOR Basis. A Short Guide to the Nuclear Reaction Data Exchange Format. – BNL-NCS/05-Rev. – 2000. DOI: <https://doi.org/10.2172/767143>.

Поступила в редакцию 18.08.2021 г.

Авторы

Басков Петр Борисович, начальник отделения, канд. техн. наук
E-mail: rm5@rambler.ru

Маричев Глеб Владиславович, аспирант
E-mail: glebmarichev@gmail.com

Сахаров Вячеслав Васильевич, доктор техн. наук, главный научный сотрудник
E-mail: rm5@rambler.ru

Степанов Владимир Александрович, начальник отделения, профессор, д-р физ.-мат. наук
E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

UDC 53.083.94/.087; 621.039.531

NUCLEAR-OPTICAL CONVERTERS FOR DETECTING INTENSE NEUTRON FIELDS

Baskov P.B. *, Marichev G.V. **, Sakharov V.V. *, Stepanov V.A. **, ***

* All-Russian Research Institute of Chemical Technology
33 Kashirskoe highway, 115409 Moscow, Russia

** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, MEPHI,
Studgorodok 1, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

*** FGBUN Interdepartmental Center of Analytical Researches in the Field of
Physics, Chemistry and Biology at the RAS Presidium
65 bld. 6 Profsoyuznaya Str. 117997 Moscow, Russia

ABSTRACT

In the design of nuclear-optical converters (NOC) for detecting intense neutron fields (fluxes over $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), it is proposed to use hybrid gas ionization chambers (IC), in which electrical and optical neutron detecting methods are combined. For hybrid ICs, a technology is proposed for obtaining radiation-resistant and mechanically strong radiator materials capable of operating at temperatures up to 1000°C . This technology is based on solid-phase boron diffusion saturation of steel. It is shown that, at thermal neutron fluxes from $1 \cdot 10^{10} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, the integral intensity of argon luminescence as a result of ionization by α -particles and ${}^7\text{Li}$ ions from layers of boride phases is sufficient for detection.

The combination of optical and radiation properties of multicomponent fluoride glasses makes it possible to use them as condensed active substances of NOCs. Choosing the elemental and isotopic composition, it becomes possible to use fluoride glasses for multichannel neutron detection as well as to significantly simplify the procedure for separating gamma and neutron components of radiation under conditions of intense radiation fluxes. It has been experimentally shown that upon

irradiation with a neutron flux of $1 \cdot 10^{17}$ n/(cm²·s), the intensity of Nd IR luminescence in glasses based on zirconium fluoride (ZBLAN) increases in the presence of Gd, which interacts with neutrons.

Key words: neutron detectors, gamma detectors, nuclear-optical converter, ionization chamber, scintillator, fluoride glass, intense neutron field.

REFERENCES

1. Sakharov V.V., Baskov P.B., Berikashvili V.Sh., Ivkina O.V., Kosov D.E., Mosyagina I.V., Frolov N.N., Sharipova M.A. Oxide Nanoscale Modification of the Surface of Inorganic Materials. *Nanoinzheneriya*. 2011, no. 6, pp. 15-25 (in Russian).
2. Sakharov V.V., Mosyagina I.V., Baskov P.B., Stepanov V.A. Physics and Materials Science Combinatorics of Film-Fiberglass Materials for Radiation-Luminescent Detection of Neutron Fluxes. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti*. 2016, no. 2 (82), pp. 55-63 (in Russian).
3. Malyshev E.K., Zasadych Yu.B., Stabrovsky S.A. *Gas Discharge Detectors for Monitoring Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 160 p. (in Russian).
4. Baskov P.B., Marichev G.V., Sakharov V.V., Stepanov V.A. Hybrid cameras for detecting neutron fields. *Proc. of the XIV-th All-Russian Scientific Conference «Technologies and Materials for Extreme Conditions»*, ed. ac. B.F. Myasoedov. Moscow. MTsAI RAN Publ., 2019, pp. 332-336 (in Russian).
5. Potapov S.P. On the Use of Stable Boron Isotopes. *Atomnaya Energiya*. 1961, v.10, iss. 3, pp. 244-252 (in Russian).
6. Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. *Borids*. Moscow. Atomizdat Publ., 1975, 376 p. (in Russian).
7. Evdokimov V.D., Klimenko L.P., Evdokimova A.N. *Hardening Technology for Machine-Building Materials: Reference Book*. 2-nd ed. Kiev. Professional Publ., 2006, 352 p. (in Russian).
8. Voroshin L. *Boring of Industrial Steels and Cast Irons: Reference Book*. Minsk. Belarus' Publ., 1981, 205 p. (in Russian).
9. Striganov A.R., Sventitsky N.S. *Spectral Line Tables*. Moscow. Atomizdat Publ., 1966, 900 p. (in Russian).
10. *Physical Quantities: Handbook*. Eds. I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhova. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).
11. Omarov O.A., Omarova N.O., Omarova P.Kh., Ramazanova A.A., Al-Khareti F.M.A., Khachalov M.B. Plasma Spectroscopy of Spark Breakdown of Gases in Strong Magnetic Fields. *Inzhenernaya Fizika*. 2013, no. 5, pp. 50-58 (in Russian).
12. Egorov Yu.A. *Scintillation Method of Spectrometry of Gamma Radiation and Fast Neutrons*. Moscow. Gosatomizdat Publ., 1963, 306 p. (in Russian).
13. Patent USA 5680423 (Oct. 1997) Perkins, et al. (class USA 376/153).
14. Hobson P.R., et al. Dense, Fast, Radiation-Tolerant Fluoro-Hafnate Glass Scintillators for Electromagnetic Calorimeters in High Energy Physics. *Proc. of the Int. Conf. on Inorganic scintillators and their applications (SCINT95)*. Delft University Press (Netherlands), 1996, pp. 317-324.
15. Stepanov V.A., Baskov P.B., Chernov V.M., Fedorov V.D., Khorozova O.D., Kurdyavko P.V., Sakharov V.V., Stepanov P.A. Fluoride glasses as materials for radiation optics. *Proc. of the XIII-th Int. Symposium on Non-Oxide Glasses and New Optical Glasses*. Pardubice, Czech Republic, 2002. Part II, pp. 674-677.
16. Baskov P.B., Sakharov V.V., Stepanov V.A. Multicomponent Fluoride Glasses for Detecting Radiation Fields. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti*. 2015, no. 3, pp. 115-120 (in Russian).
17. Sakharov V.V., Baskov P.B., Stepanov V.A., Stepanov P.A., Federov V.D. Oxygen-Free Optical Materials for Radiation Optics. *VANT. Ser. Materialovedenie i Novyye Materialy*. 2004, iss.1 (62), pp. 231-244 (in Russian).

18. Baskov P.B., Kurdyavko P.V., Plaksin O.A., Sakharov V.V., Stepanov V.A., Stepanov P.A. Radioluminescence of Fluoride Glasses. *Proc. of the XIII-th Int. Symposium on Non-Oxide Glasses and New Optical Glasses*. Pardubice, Czech Republic, 2002. Part II, pp. 534-536.

19. Makhov V.N., Kamenskikh I.A., Terekhin M.A. et. al. *Proc. of the Int. Conf. on Inorganic Scintillators and Their Application (SCINT95)*, 1995, pp. 208-211.

20. Baskov P.B., Sakharov V.V., Stepanov V.A., Stepanov P.A., and Kurdyavko P.V. Photoinduced Recovery of Gamma-Irradiated Fluoride Glasses. *Technical Physics Letters*. 2002, v. 28, iss. 9, pp. 790-791; DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1511787>.

21. McLane V. *EXFOR Basis. A Short Guide to the Nuclear Reaction Data Exchange Format*. BNL-NCS/05-Rev, 2000; DOI: <https://doi.org/10.2172/767143>.

Authors

Baskov Pyotr Borisovich, Department Director, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: rm5@rambler.ru

Marichev Gleb Vladislavovich, PhD Student

E-mail: glebmarichev@gmail.com

Sakharov Vyacheslav Vasilievich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: rm5@rambler.ru

Stepanov Vladimir Aleksandrovich, Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru