

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ИМПУЛЬСНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

OPTICAL MATERIALS AND FIBERS IN EXPERIMENTS ON PULSED NUCLEAR REACTORS

*В. В. Горбунов, Л. Е. Довбыш, С. П. Мельников, А. В. Сеницын
L. E. Dovbysh, V. V. Gorbunov, S. P. Melnikov, A. V. Sinitsyn*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific-Research Institute
of Experimental Physics

Представлен обзор методик по исследованию радиационной стойкости оптических материалов и волоконных световодов, разработанных для импульсных ядерных реакторов
Review of methods relating to radiation-resistance investigations of optical materials and fibers on pulse nuclear reactors are presented.

Введение

На протяжении примерно 45 лет во ВНИИЭФ проводились исследования, направленные на изучение радиационной стойкости оптических материалов и волоконных световодов при воздействии ионизирующих излучений. Для проведения подобных работ, связанных с изучением радиационной стойкости различных объектов гражданского и военного назначения во ВНИИЭФ созданы моделирующие и облучательные комплексы на базе импульсных ядерных реакторов (ИЯР) [1] и сильноточных электронных ускорителей [2]. Большой вклад в становление и развитие исследований по радиационной стойкости оптических материалов и световодов на ИЯР внесли сотрудники ИЯРФ (бывшее отделение 04): А. М. Воинов, Т. А. Бабичева, О. А. Голубева, А. Т. Казакевич, В. М. Карюк, М. Ф. Костенко, В. Н. Кривонос, С. Н. Лебедев, Л. М. Павловская, А. А. Синянский и авторы данного доклада. В этих исследованиях принимали также участие сотрудники других подразделений ВНИИЭФ: А. С. Парасына, С. Н. Попов, А. В. Руднев и др.

Необходимость проведения исследований в области радиационной стойкости оптических материалов и световодов первоначально была обусловлена тем, что во ВНИИЭФ в конце 1960-х годов начались научные научно-исследовательские работы по поиску и изучению лазерных сред с ядерной накачкой [3,4]. Экспери-

ментальные исследования лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) проводились, в основном, на ИЯР, что накладывает ограничения на выбор оптических материалов и фотоприемников, а также заставляет принимать специальные меры по проверке работоспособности отдельных узлов лазерной установки в момент и после воздействия на нее излучения импульсного реактора. В связи с этими обстоятельствами параллельно с исследованиями самих ЛЯН проводилось изучение радиационной стойкости лазерных элементов (зеркала, окна) и фотоприемников, а также активных сред лазеров на конденсированных средах (кристаллы, стекла, жидкости) [5–7]. Позже в различных лабораториях стали достаточно интенсивно проводиться исследования радиационной стойкости оптических материалов и волоконных световодов в связи с их использованием в приборах военного и гражданского назначения, которые подвергаются воздействию проникающих излучений [8–13].

В докладе приведен обзор методик экспериментов и некоторых результатов исследований во ВНИИЭФ радиационной стойкости оптических материалов и волоконных световодов. В качестве источников нейтронного и γ -излучения использовались импульсные реакторы ВИР-1, ВИР-2, ВИР-2М, БИР-2, ТИБР, БР-1, ГИР-2 [14].

1. Оптические материалы

Под действием ионизирующего излучения в оптическом материале возникают различные ра-

радиационные эффекты: свечение материала по механизму черенковского излучения, радиoluminesцентное свечение, усиление зондирующего света за счет вынужденного излучения радиационно-возбужденных дефектов (центров окраски), потери светового излучения за счет наведенного радиацией поглощения. Последний эффект является, как правило, наиболее важным последствием облучения, определяющим возможность использования конкретного оптического материала в условиях радиационного воздействия.

Имеющиеся в настоящее время данные по радиационной стойкости оптических материалов были получены, в основном, при использовании статических изотопных источников γ -излучения с мощностями дозы $P_\gamma \leq 10$ Гр/с или статических ядерных реакторов ($P_\gamma \leq 10^3$ Гр/с, плотность потока нейтронов $F \leq 10^{13}$ см⁻²·с⁻¹). В этих экспериментах измерялся наведенный коэффициент поглощения до и после облучения в зависимости от интегральной дозы. Следует отметить, что данные, полученные при статическом облучении, нельзя использовать для прогнозирования наведенного коэффициента поглощения в процессе импульсного облучения, так как часто большой вклад в поглощение вносят центры окраски с малыми временами жизни. Коэффициенты наведенного поглощения для этих двух вариантов облучения могут отличаться на порядок величины и более.

Ниже приведены некоторые экспериментальные методики, разработанные во ВНИИЭФ для проведения исследований на ИЯР [14], позволяющие определять коэффициенты поглощения оптических материалов в процессе импульсного облучения и через любые промежутки времени после него. Флюенсы нейтронов в экспериментальных каналах реакторов варьировались в диапазоне 10^{13} – 10^{15} см⁻² за импульс при длительностях реакторных импульсов от 50 мкс до 10 мс. Максимальные дозы γ -излучения составляли $D_\gamma \leq 5 \cdot 10^3$ Гр за импульс.

1.1. Дистанционные спектрофотометры

В основу методик по определению наведенного коэффициента поглощения оптического образца положен достаточно простой принцип измерения интенсивности светового излучения, прошедшего через образец до облучения и в любой последующий момент времени. Особенностью экспериментов на ИЯР является необходимость

размещать фотоприемники (например, фотоэлектронные умножители) на значительных расстояниях от зоны облучения образцов за биологической защитой. В зависимости от характера решаемых задач и специфики проведения экспериментов на ИЯР, связанной с транспортировкой светового излучения от образца до фотоприемника, было разработано несколько экспериментальных методик. Основной вклад в разработку этих методик внесли А. Т. Казакевич, В. Н. Кривоносов, А. А. Синянский. Первые эксперименты были выполнены в 1969 г.

В одном из вариантов дистанционной спектрофотометрии (рис. 1), который использовался при больших расстояниях от образца до фотоприемника, в качестве просвечивающего светового источника применялись лазерные источники: He-Ne лазер ($\lambda = 633, 1150$ и 3390 нм), CO₂-лазер ($\lambda = 10,6$ мкм), полупроводниковые лазеры. Зондирующий лазерный луч (1), промодулированный механическим прерывателем (2) с частотой 5-10 кГц, дважды проходил образец и попадал на входную линзу (8) фотоприемного узла (9). Механический прерыватель (модулятор) представлял собой металлический диск с равномерно расположенными по окружности отверстиями. Модуляция светового луча позволяла отделить полезный сигнал от радиационной наводки и люминесцентного излучения образца. Поворотные зеркала (3) и (7), имеющие специальные юстировочные приспособления, укреплены на конце трубы (6) с зачерненной внутренней поверхностью. На другом конце трубы находился контейнер с облучаемым образцом (4) и автоколлимационным зеркалом (5). После предварительной юстировки труба с образцом размещалась в зоне облучения I вблизи активной зоны реактора (10). Все остальные оптической схемы располагались в зоне II за предварительной защитой (12), где доза рассеянного проникающего излучения составляет 0,001–0,005 Гр за импульс.

Лазер работает, как правило, на одной длине волны. Можно одновременно использовать несколько лазеров (на рис. 1 показаны два лазера), что позволяет получить информацию о наведенных коэффициентах поглощения в разных областях спектра за один реакторный импульс. Разделение световых лучей производилось в фотоприемном узле с помощью селективных поворотных зеркал (9.1) и светофильтров (9.2). Регистрирующая аппаратура (14) располагалась вне зоны облучения за биологической защитой (13).

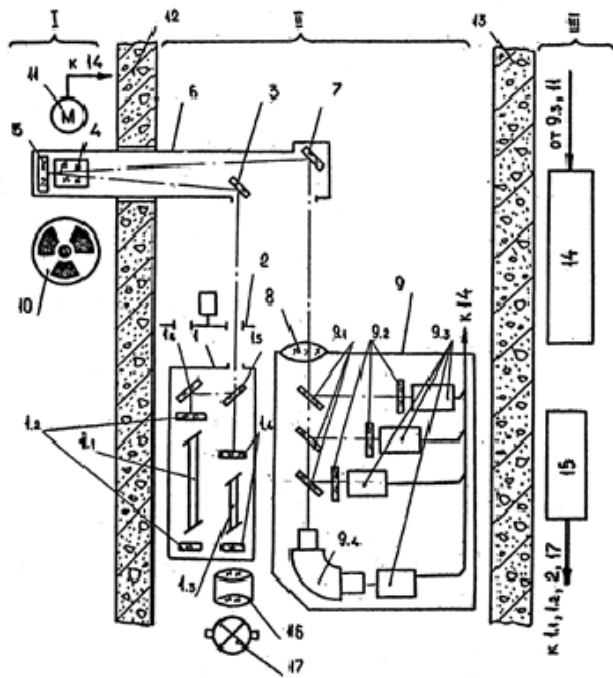


Рис. 1. Схема измерения наведенного поглощения с использованием лазеров (I – зона облучения, II – зона после предварительной защиты, III – измерительная зона): 1 – источники светового излучения (1,1, 1,3 – лазерные трубки, 1,2, 1,4 – зеркала резонаторов, 1,5, 1,6 – поворотные зеркала); 2 – механический модулятор; 3, 7 – поворотные зеркала; 4 – исследуемый образец; 5 – зеркало; 6 – труба; 8 – линза; 9 – фотоприемный узел (9,1 – поворотные зеркала, 9,2 – светофильтры, 9,3 – фотоприемники, 9,4 – монохроматор); 10 – активная зона реактора; 11 – монитор реакторного излучения; 12 – предварительная защита; 13 – биологическая защита; 14 – регистрирующая аппаратура; 15 – блок управления; 16 – объектив; 17 – дуговая ксеноновая лампа

Кроме лазеров, которые работают на ограниченном количестве спектральных линий, в качестве источника зондирующего излучения в некоторых экспериментах использовалась дуговая ксеноновая лампа (17) со сплошным спектром излучения в диапазоне 0,4–1,1 мкм. В этом случае измерения можно было проводить на любой длине волны указанного диапазона. Лампа работала в режиме токовой модуляции с частотой 5 кГц, поэтому механический модулятор отсутствовал. Зондирующий луч формировался с помощью линзовой системы (16). Для выделения узкого спектрального интервала применялись светофильтры (9.2) или монохроматор (9.4).

Другой тип установки с источником сплошного спектра на основе миниатюрной кварцевой

лампы накаливания показан на рис. 2. В отличие от схемы на рис. 1, здесь световой источник размещался в зоне облучения, а механический модулятор состоял из двух дисков (6) и (8), которые закреплены на одном валу электродвигателя (7). В диске (8) равномерно по окружности располагалось 48 отверстий диаметром 3 мм, а в диске (6) – 24 отверстия. Модулятор обеспечивает прерывание светового луча через образец с частотой несколько кГц. Использование двух синхронно вращающихся дисков с частотами модуляции, отличающимися в 2 раза, позволяет регистрировать отдельно изменение пропускания образца и его радиoluminesцентное свечение в процессе реакторного импульса на фоне сигнала радиационной помехи. Длительное время в качестве регистраторов применялись электронно-лучевые осциллографы. При использовании цифровых регистраторов [15], имеющих динамический диапазон регистрации три-четыре порядка, точность измерений существенно повышается.

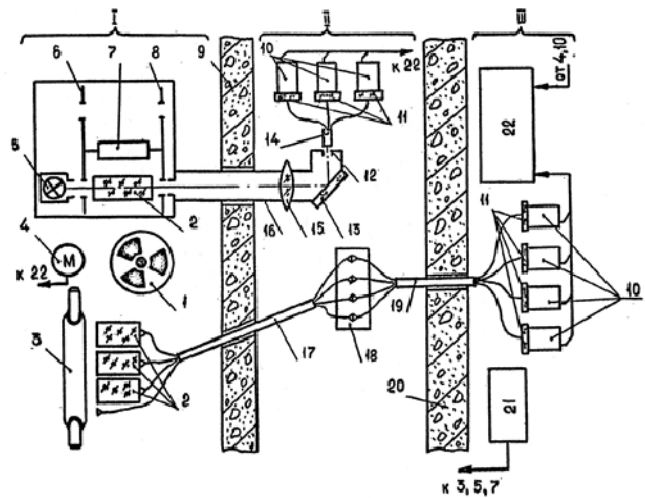


Рис. 2. Схема измерения наведенного поглощения с источником сплошного спектра (I – зона облучения, II – зона после предварительной защиты, III – измерительная зона): 1 – активная зона реактора; 2 – исследуемый образец; 3 – лампа-вспышка; 4 – монитор реакторного излучения; 5 – лампа накаливания; 6, 8 – диски механических модуляторов; 7 – двигатель модулятора; 9 – предварительная защита; 10 – фотоприемники; 11 – светофильтры; 12 – диафрагма; 13 – поворотное зеркало; 14 – волоконный размножитель; 15 – линза; 16 – труба; 17 – световоды; 18 – оптический разъем; 19 – волоконно-оптическая линия; 20 – биологическая защита; 21 – блок управления; 22 – регистрирующая аппаратура

Рассмотренные выше методики применялись в экспериментах на ИЯР с длительностью импуль-

са 1–10 мс (реакторы ВИР, ТИБР). При исследовании радиационной стойкости оптических материалов на реакторе БР-1 с длительностью импульса около 60 мкс применялась методика просвечивания образцов импульсным источником света. В зоне облучения (см. нижнюю часть рис. 2) располагалась импульсная ксеноновая лампа (3), световое излучение которой проходило одновременно через три расположенных параллельно оптических образца. Длительность светового импульса составляла 600 мкс по основанию. Образцы были отделены друг от друга экранами. Световое излучение, прошедшее через образец, а также контрольное излучение лампы подавалось на фотоприемники (10) с помощью радиационно-стойких световодов (17).

1.2. Некоторые результаты исследований

На рис. 3 показан типичный вид первичной информации (импульсный реактор ГИР-2). Коэффициент наведенного поглощения $k_{ин}$ определялся из закона Бугера-Ламберта-Бера: $I = I_0 \exp(-k_{ин} \cdot d)$, где I_0 и I – интенсивности зондирующего излучения на входе в образец и на выходе из него, d – толщина образца.

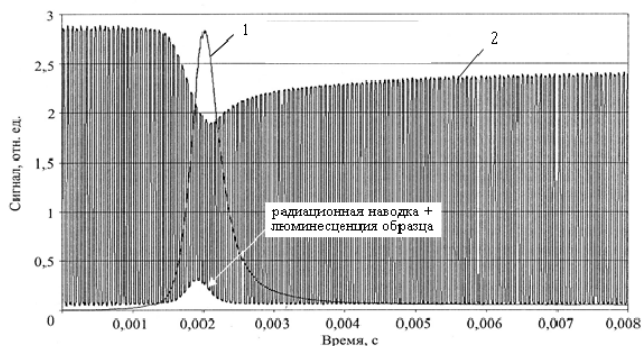


Рис. 3. Первичная информация с регистратора (1 – реакторный импульс, 2 – сигнал с фотоприемника)

В качестве примера на рис. 4. и рис. 5 приведены осциллограммы экспериментов на реакторах ВИР-2 и ТИБР по измерению наведенных коэффициентов поглощения в ВаF₂ и германии. В первом случае измерения проводились одновременно на трех длинах волн He-Ne лазера. Мощность поглощенной дозы γ -излучения в максимуме реакторного импульса составляла около $1 \cdot 10^6$ Гр/с. Вклад нейтронного излучения в поглощенную дозу не превышал 10 %. Коэффициенты наведенного поглощения на длинах волн 633, 1150 и 3390 нм в

максимуме импульса составили 0,65; 0,27 и $< 0,01 \text{ см}^{-1}$ соответственно. Из данных рис. 4 видно, что наведенный коэффициент поглощения снижается с увеличением длины волны зондирующего излучения. Такая закономерность наблюдалась для всех оптических материалов (см., например, рис. 7).

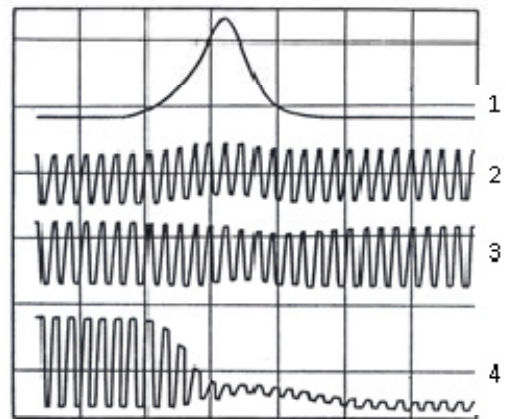


Рис. 4. Изменение коэффициента пропускания кристалла ВаF₂ толщиной 10 мм при облучении импульсом n, γ -излучения реактора ВИР-2: 1 – импульс реактора; 2, 3, 4 – сигналы модулированного зондирующего излучения с длинами волн 3390, 1150 и 633 нм соответственно. Цена деления по оси абсцисс – 5 мс

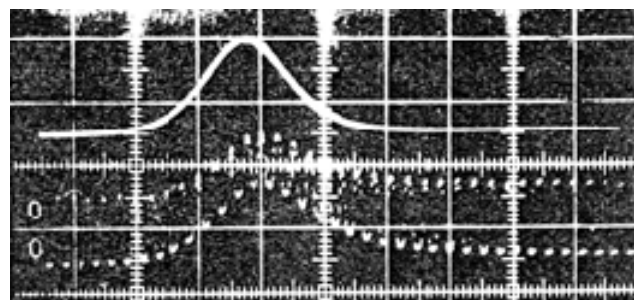


Рис. 5. Осциллограмма эксперимента на реакторе ТИБР по измерению наведенного поглощения в германии на длине волн 10,6 мкм ($D_\gamma = 70$ Гр, нейтронный флюенс – $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, толщина образца – 6 мм, цена деления по оси абсцисс – 1 мс)

Исследования радиационно-оптической стойкости в диапазоне спектра 0,4–1,2 мкм были выполнены для некоторых марок промышленных стекол, пирекса, свинцово-силикатных, дозиметрических и других марок стекол, ионных кристаллов, пластмасс (полистирола, полиметилметакрилата). Как показали результаты исследований, коэффициенты наведенного поглощения зависят не только от интегральной дозы, рода материала и длины волны зондиру-

ющего излучения, но и от мощности поглощенной дозы. В табл. 1 показаны значения коэффициентов пропускания на длине волны $\lambda = 633$ нм для ряда материалов. Из приведенных данных видно, что через сутки после окончания реакторного импульса светопропускание некоторых образцов восстанавливается до начального уровня. Для некоторых стекол (например, для содержащего церий стекла К-108) времена отжига $\tau_{\text{эфф}}$ сравнимы с длительностью реакторного импульса и светопропускание образца восстанавливается сразу же после окончания импульса. Помимо показанных в таблице 1 времен отжига $\tau_{\text{эфф}} \sim 10\text{--}100$ мс, в некоторых типах стекол (С87-1, С50-4 и др.) существуют более долгоживущие центры окраски, времена жизни которых измеряется десятками секунд.

Таблица 1

Пропускание светового излучения для некоторых материалов в экспериментах на реакторе ВИР-2 ($D_\gamma = 5 \cdot 10^3$ Гр, нейтронный флюенс $- 2 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$, $\lambda = 633$ нм, толщина образцов $- 5$ мм): T_0 , $T_{\text{мин}}$, T_{24} – соответственно коэффициенты начального пропускания образца, минимального пропускания в процессе импульса и пропускания через сутки после облучения; $\tau_{\text{эфф}}$ – эффективное время отжига центров окраски

Материал	T_0 , %	$T_{\text{мин}}$, %	T_{24} , %	$\tau_{\text{эфф}}$, мс
Кварц КВ	94	60	94	100
Кварц КУ-1	94	85	94	20
Стекло К-208	84	40	84	10
Цериевое стекло РС-4	75	56	75	10
Чистый полистирол	84	84	84	–
Свинцовое стекло	80	0	32	–
Пирекс	81	0	72	–
CaF $_2$	86	0	56	–

Эксперименты в средней ИК области спектра были выполнены с использованием СО $_2$ -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм). В этой области спектра поглощение светового излучения определяется, в основном, взаимодействием со свободными электронами, возникающими в процессе облучения. Поэтому для всех испытанных материалов коэффициенты пропускания восстанавливались к концу реакторного импульса. В табл. 2 представлены результаты измерения наведенного

коэффициента поглощения для ряда инфракрасных материалов. После облучения почти все прозрачные материалы приобретали разнообразную и равномерную окраску. Исключение составил поликристаллический ZnSe (иртран-4), в котором появились заметные оптические неоднородности в виде темных продолговатых областей (рис. 6). Возникновение таких областей является, по-видимому, результатом структурных превращений под действием проникающих излучений.

Таблица 2

Наведенные коэффициенты поглощения k_m для ряда инфракрасных материалов на линии 10,6 мкм (реактор ТИБР, $D_\gamma = 70$ Гр, нейтронный флюенс $- 1,5 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$)

Материал	Ge	NaCl	ирт-ран-4	BaF $_2$	KBr	KCl	CsI
Наведенный коэффициент поглощения, см $^{-1}$	0,52	0,11	0,17	0,06	0,07	0,03	0,02



Рис. 6. Фотография повреждений в иртране-4, возникающих после облучения (реактор ВИР-2, $D_\gamma = 5 \cdot 10^3$ Гр, нейтронный флюенс $- 2 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$). Увеличение $- 50$ раз

Исследования различных оптических материалов показали, что в видимой и ближней ИК областях спектра наиболее высокой радиационной стойкостью обладают кварцевые стекла. В спектрах поглощения, измеренных через 1 ч после облучения, у всех типов кварца присутствует характерная для SiO $_2$ полоса с максимумом на длине волны 215 нм. В кварце КИ, где отсутствует гидроксильная группа ОН, помимо указанной полосы присутствуют широкие полосы с максимумами на длинах волн 300 и 550 нм, а в кварце КВ – полоса с максимумом на длине волны 300 нм. Коэффициенты наведенного поглощения для кварцевых стекол на разных длинах волн представлены в табл. 3.

Таблица 3

Максимальные наведенные коэффициенты поглощения $k_{ин}$ (см^{-1}) в кварцевых стеклах при мощности поглощенной дозы около $1 \cdot 10^6$ Гр/с

Тип кварцевого стекла	Длина волны зондирующего излучения, нм				
	400	500	600–700	900	1150
КИ	0,6	–	0,28	0,022	0,015
КВ	0,36	–	0,18	< 0,01	< 0,01
КУ-1	0,07	0,045	< 0,003	< 0,005	< 0,005

Существует набор лигатур, позволяющих изменять чувствительность стекол к различным видам ионизирующего излучения. Одним из ионов-протекторов для кварцевого стекла является ион OH^+ . Защитные свойства радикала OH^+ были отмечены при сравнении наведенного поглощения в стекле КУ-1, концентрация гидроксильных OH -групп в котором составляет 1000 ppm (содержание примесей ~ 20 ppm), с наведенным поглощением в стекле КИ, в котором концентрация OH -групп составляет до 1 ppm (содержание примесей ~ 100 ppm). При импульсном облучении на реакторе ВИР-2М ($D_\gamma = 4,5 \cdot 10^3$ Гр) в стекле КИ коэффициент наведенного поглощения $k_{ин} = 0,28 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне спектра 0,6–0,7 мкм. В стекле КУ-1 в аналогичных условиях облучения $k_{ин} = 0,003 \text{ см}^{-1}$. Такое защитное влияние гидроксильных OH -групп объясняется снижением концентрации центров поглощения за счет рекомбинации свободных носителей при захвате ионом-протектором OH^+ .

В условиях облучения наиболее благоприятным спектральным диапазоном для передачи светового излучения через кварцевую среду является ближний ИК-диапазон. В качестве примера на рис. 7 показана зависимость максимального значения $k_{ин}$ для стекла КИ от длины волны зондирующего света при импульсном облучении на реакторе ВИР-2М ($D_\gamma = 4,5 \cdot 10^3$ Гр).

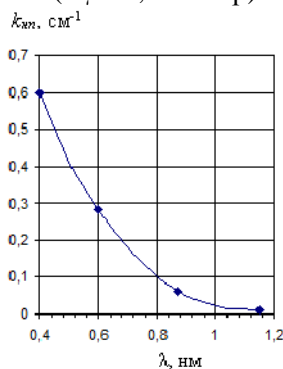


Рис. 7. Зависимость максимального коэффициента наведенного поглощения в кварцевом стекле КИ от длины волны светового излучения при импульсном облучении

Кроме твердотельных оптических материалов в экспериментах на ИЯР изучались также жидкие среды, что было связано с поиском активных сред для жидкостных ЛЯН, возбуждаемых осколками деления урана [6,7]. Так, эксперименты на реакторе ВИР-2 по изучению прозрачности водного раствора $^{235}\text{UO}_2\text{SO}_4$ (концентрация урана около $0,05 \text{ г/см}^3$) показали, что в процессе реакторного импульса коэффициент пропускания раствора на $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ плавно снижается, а при достижении удельного энерговыклада около 30 Дж/см^3 раствор вскипает и полностью теряет прозрачность. Для уменьшения оптических потерь, связанных с образованием парагазовых пузырьков, можно увеличить давление в жидкости или, например, использовать кювету, в которой отсутствует свободный объем [7].

1.3. Радиолуминесцентный спектрофотометр

Для таких материалов, как сцинтилляторы или люминофоры, интенсивность люминесцентного излучения настолько значительна, что использование рассмотренных выше методик для измерения наведенного поглощения в полосе собственного излучения становится невозможным.

Методика измерения наведенного коэффициента поглощения для люминесцирующих материалов была разработана А. А. Синянским в 1970 г. В этом же году им были проведены экспериментальные исследования по измерению коэффициентов наведенных потерь для лазерных активных сред на основе неодимового стекла, $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ (рубин), $\text{CaWO}_4:\text{Nd}^{3+}$, $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$, а также для некоторых других кристаллических и пластмассовых люминофоров. (Позже А. А. Синянский приступил к изучению газовых сред, возбуждаемых осколками деления урана, что позволило в 1972 г. впервые в мире осуществить накачку лазеров ядерными излучениями [3, 4]).

Принцип работы методики заключается в просвечивании образца-сцинтиллятора радиолуминесцентным излучением вспомогательных сцинтилляторов с известным спектром. Схема поперечного сечения установки показана на рис. 8.

Основными элементами установки являются четыре канала для размещения образцов, механический модулятор (диск с отверстиями) с электромотором и коллиматоры. Исследуемый образец (7) размещается в одном из верхних каналов (другой верхний канал – пустой), а в двух нижних каналах помещены два одинаковых сцинтиллятора (4, 5), которые выполняют роль радиолуминесцент-

ных световых источников (сцинтилляторы-источники). В процессе реакторного импульса при включенном модуляторе на фотоприемник поочередно попадает излучение сцинтиллятора-источника из канала (4) и суммарное излучение исследуемого образца (7) и излучение сцинтиллятора-источника (5), прошедшее через образец. Осциллограмма одного из экспериментов показана на рис. 9. Из сравнения измеренных амплитуд сигналов можно определить наведенные коэффициенты поглощения в полосе люминесценции сцинтиллятора-источника.

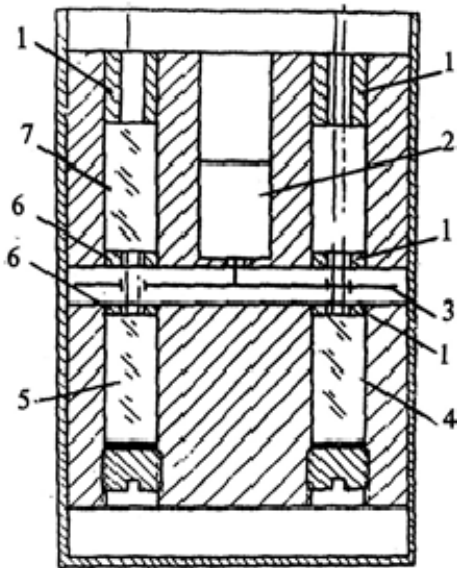


Рис. 8. Схема радиOLUMИнесцентного спектрофотометра: 1, 6 – коллиматоры светового пучка; 2 – мотор модулятора; 3 – модулятор (диск с отверстиями); 4, 5 – сцинтилляторы-источники; 7 – исследуемый образец

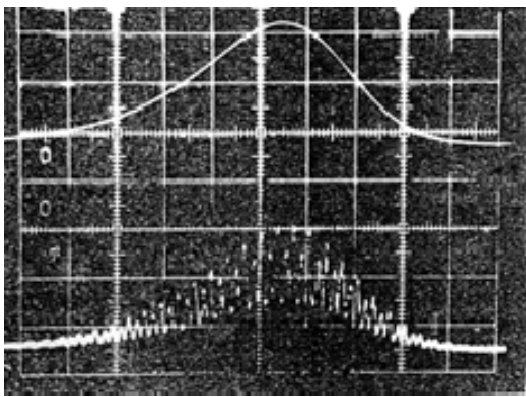


Рис. 9. Осциллограмма эксперимента с неодимовым стеклом ЛГС: верхний луч – импульс реактора ВИР-1М, нижний луч – сигнал с фотоприемника ($D_\gamma = 500$ Гр, цена деления – 2 мс/дел)

С использованием данной методики была проведена серия экспериментов на импульсном реакторе ВИР-1М при максимальных дозах $D_\gamma = 2,5 \cdot 10^3$ Гр,

в результате которых измерены коэффициенты наведенных потерь для лазерных активных сред на основе неодимового стекла, $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ (рубин), $\text{CaWO}_4:\text{Nd}^{3+}$, $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$, а также для некоторых других кристаллических и пластмассовых люминофоров. Измерения на длинах волн собственного излучения показали, что наиболее устойчивыми к импульсному γ -излучению являются рубин, неодимовое стекло, $\text{CsI}(\text{Tl})$ и чистый полистирол. Кристаллы $\text{CaWO}_4:\text{Nd}^{3+}$ и $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ оказались наименее радиационно-стойкими. К максимуму реакторного импульса при $D_\gamma = 40$ Гр коэффициент пропускания для первого кристалла снижался с 80 до 5 %, а для второго – почти до нуля.

2. Волоконные световоды

Основным эффектом, снижающим радиационную стойкость световодов при воздействии проникающих излучений, является возрастание оптических потерь (наведенного поглощения). Люминесцентное свечение играет менее важную роль в ограничении радиационной стойкости световода. Как показали результаты исследований, коэффициент наведенного поглощения зависит от материала световода и концентрации в нем примесей, температуры образца, длины волны светового излучения, мощности поглощенной дозы и интегральной поглощенной дозы.

Экспериментальные исследования с применением волоконных световодов на импульсных ядерных реакторах проводились во ВНИИЭФ в несколько этапов. Основными задачами первого этапа исследований (1977–85 гг.) являлись: 1) проверка возможности использования световодов для вывода светового излучения из центрального канала реактора ВИР-2, где обеспечивались максимальные уровни радиационного воздействия; 2) получение предварительной информации о наведенных коэффициентах поглощения для существующего в то время довольно ограниченного набора стеклянных световодов. Методика измерений, которая использовалась в этих экспериментах, показана в верхней части рис. 2. При подготовке экспериментов стеклянные световоды в виде жгутов длиной 0,1–10 м, намотанные на рамку, размещались вместо образца (2) между двумя дисками механического модулятора, что позволяло регистрировать отдельно изменение пропускания световода и его радиOLUMИнесцентное свечение в процессе реакторного импульса. Осциллограмма одного из опытов приведена на рис. 10. В качестве фотоприемников использовались фотоэлектронные умножители.

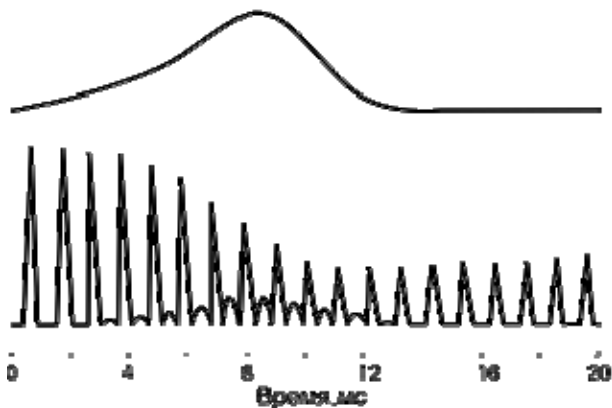


Рис. 10. Осциллограмма эксперимента с волоконным световодом на композиционной основе БФ1550/К1217: верхний луч – импульс реактора ВИР-2, нижний луч – сигнал с фотоприемника ($D_\gamma = 550$ Гр, нейтронный флюенс – $1,2 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$, длина световода – 10 м, цена деления – 2 мс). Пички с большой амплитудой – световое излучение в диапазоне 600–1200 нм, прошедшее через световод; пички с малой амплитудой – радиолуминесцентное излучение

В результате этих экспериментов были выбраны оптимальные составы многокомпонентных стекол с разной концентрацией церия, который играл роль защитной добавки (рис. 11). Наведенный коэффициент поглощения исходных световодов $k_{ин} \sim 1$ см $^{-1}$ при $D_\gamma = 4 \cdot 10^3$ Гр, а при оптимальной концентрации церия (около 3 %) в тех же условиях $k_{ин} = 5 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$.

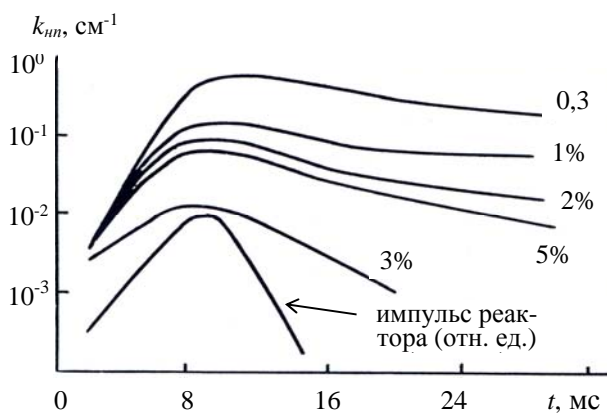


Рис. 11. Изменение коэффициента наведенных потерь в стеклянных световодах в процессе облучения при разных концентрациях церия (реактор ВИР-2М, $D_\gamma = 4 \cdot 10^3$ Гр)

В середине 1980-х годов появились моноволоконные кварцевые световоды с низкими потерями света в несколько дБ/км (1 дБ/км = $2,3 \cdot 10^{-6}$ см $^{-1}$), разработанные для передачи информации на большие расстояния. Светопроводящие свойства в кварцевом световоде формируются в двухслойной коаксиаль-

ной структуре в результате уменьшения коэффициента преломления при введении в кремнезем SiO $_2$ добавок бора, фтора, германия, фосфора и некоторых других. В связи с тем, что радиационная стойкость SiO $_2$ зависит от концентрации примесей, далее в экспериментах на ИЯР была изучена реакция на облучение всех доступных сочетаний SiO $_2$ с добавками различного стехиометрического состава, изготовленных отечественными и зарубежными производителями.

В этих экспериментах использовалась несколько измененная схема измерений (рис. 12). В отличие от предыдущей схемы (верхняя часть рис. 2) световоды длиной около 100 м сматывались в бухту, которая размещалась вблизи активной зоны реактора. Подводящие концы световода выводились за биологическую защиту реактора, где располагалось измерительное оборудование. Вид первичной информации в этом случае был примерно такой же, как на рис. 3. Использовались современные оптоэлектронные полупроводниковые излучатели и фотоприемники, а также регистрирующая аппаратура на базе универсальных измерительных плат фирмы National Instruments.

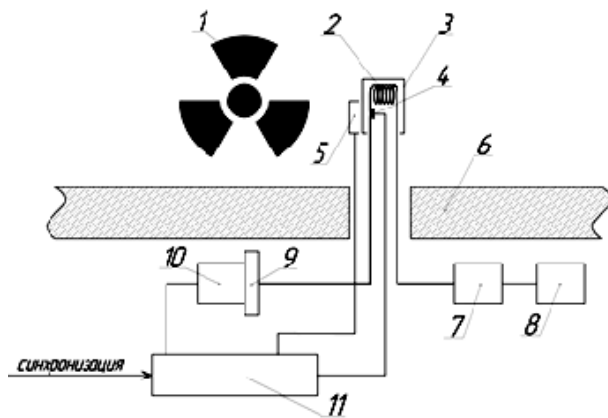


Рис. 12. Модифицированная схема измерений наведенного поглощения световодов: 1 – активная зона реактора; 2 – исследуемый образец; 3 – термостат; 4 – датчик температуры в термостате; 5 – гамма-нейтронные детекторы; 7 – модулятор; 8 – источник зондирующего света; 9 – светофильтры; 10 – фотоприемник; 11 – аппаратный комплекс

Как и в случае с оптическими материалами (см. раздел 1.2), для кварцевых световодов при воздействии радиации наиболее благоприятным для передачи светового сигнала является ближний ИК диапазон спектра (рис. 13). Дополнительные измерения, которые были выполнены на ИЯР для наиболее часто используемых в волоконных линиях коммуникационных длин волн 850, 1300 и 1550 нм, подтверждают этот вывод.

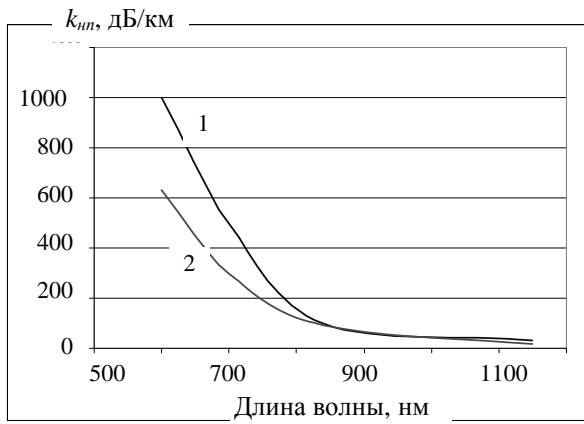


Рис. 13. Зависимость максимального наведенного коэффициента поглощения от длины волны зондирующего излучения при $D_\gamma = 140$ Гр за импульс (1 – волокно $\text{SiO}_2 \cdot \text{GeO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, 2 – волокно $\text{SiO}_2 \cdot \text{GeO}_2$)

Типичный набор экспериментальных данных по каждому образцу световода включал зависимость наведенного поглощения от дозы в диапазоне $0,1\text{--}10^4$ Гр, зависимость наведенного поглощения от мощности дозы в диапазоне $10\text{--}10^7$ Гр/с и кривые отжига после облучения в диапазоне времени $10^{-3}\text{--}10^6$ с, измеренные, как правило, на нескольких длинах волн. Исследования были выполнены для трех групп световодов, которые далее обозначены как тип А, тип В и тип С. В кварцевом стекле типа А, несмотря на совершенство технологии изготовления волокна, вместе с контролируемой добавкой в состав волокна вносятся красящие примеси концентрацией до 50 ppm, что приводит к образованию стабильных центров поглощения. Особо чистое кварцевое стекло типа В имеет в своем составе минимальное количество примесей ($\sim 0,1$ ppm), а в кварцевом стекле типа С концентрация гидроксильных ОН-групп, которые выполняют защитные функции, достигает 1200 ppm. На рис. 14 представлены зависимости наведенных коэффициентов поглощения для трех типов кварцевых световодов от интегральной дозы и мощности дозы.

Характерной особенностью для световода типа В является насыщение дозовой зависимости коэффициента наведенного поглощения (рис. 14а) и быстрое восстановление пропускания после облучения. Для световодов типа С проявились явно выраженные защитные свойства иона-протектора OH^+ , ускоряющего процесс рекомбинации свободных носителей и уменьшающего скорость образования центров поглощения, что приводит в некоторых случаях к уменьшению наведенного поглощения в сто и более раз (рис. 14а). Следует, однако, отметить, что присутствие в материале

световода гидроксильной группы ОН приводит к появлению мощных полос поглощения и дополнительным потерям излучения в ближнем ИК диапазоне спектра, который является наиболее востребованным для передачи информации в волоконных линиях связи.

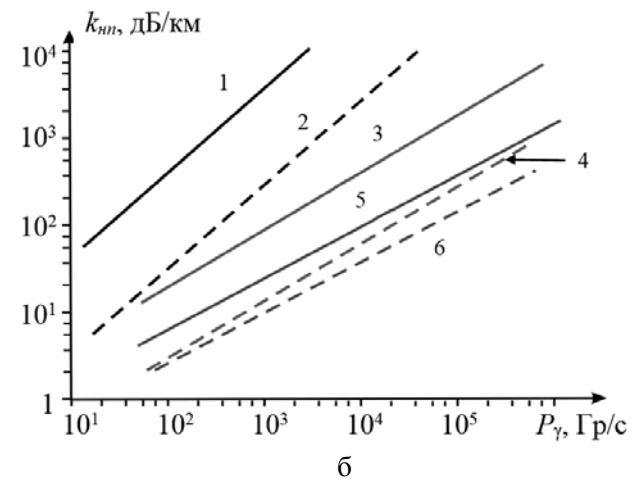
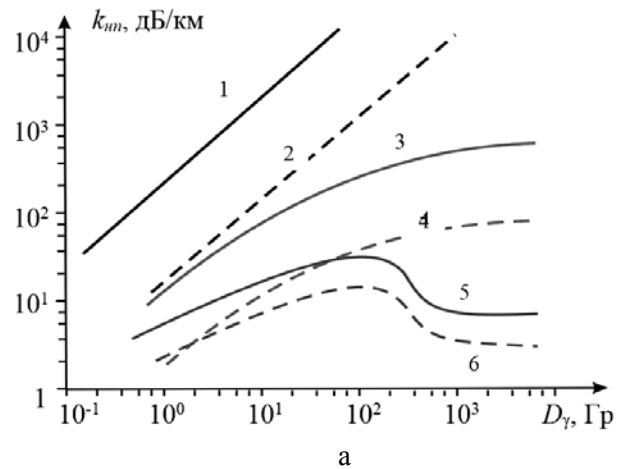


Рис. 14. Зависимости наведенного коэффициента поглощения от интегральной дозы (а) и максимальной за импульс наведенного коэффициента поглощения от мощности дозы (б) на линиях 850 нм (1, 3, 5) и 1300 нм (2, 4, 6): 1, 2 – световоды А; 3, 4 – световоды В; 5, 6 – световоды С

Такие легирующие примеси, как германий, бор, фтор и фосфор, не вносят дополнительного исходного поглощения, но их присутствие влияет на кинетику носителей зарядов при облучении, поэтому радиационно-оптические свойства легированных световодов изменяются. Опыты показали, что бор и фтор не оказывают существенного влияния на величину и на динамику поглощения. Легирование германием приводит к существенным, но весьма кратковременным, оптическим

потерям при импульсном облучении. Добавки фосфора при концентрации более 0,5 вес. % нейтрализуют процесс образования нестабильных центров поглощения и коэффициент наведенного поглощения при импульсном облучении снижается до 0,3 дБ/км при дозе $4,5 \cdot 10^3$ Гр за импульс. Наоборот, при статическом облучении легирование сердцевинны волокна фосфором приводит к увеличению наведенного коэффициента поглощения примерно на порядок величины.

Поглощение оптического излучения в световодах в процессе облучения происходит в результате образования стабильных и нестабильных центров окраски, которые возникают при захвате носителей заряда (электронов и дырок) на дефекты структуры, имеющиеся в материале до облучения.

Нейтронно-стимулированное дефектообразование в SiO_2 начинает проявляться в спектре поглощения при дозах более 10^5 Гр. При $D_\gamma < 10^4$ Гр основной вклад в образование центров окраски вносит ионизационная компонента реакторного излучения. Наведенное поглощение в световодах на основе кварцевого стекла обусловлено двумя группами центров окраски. Нестабильные центры окраски, ограничивающие пропускание световодов в процессе и сразу после воздействия радиации, образованы уровнями, происхождение которых связано со структурой кварцевого стекла. Стабильные центры окраски возникают на уровнях примеси металлов переходной группы (Cr, V, Mn, Cu, Fe, Co, Ni).

В настоящее время для скоростных систем передачи информации используются одномодовые световоды с предельно низкими начальными коэффициентами поглощения 0,2–1 дБ/км, работающие на коммуникационной длине волны 1,55 мкм. Типичные размеры таких световодов: диаметр сердцевинны 5–10 мкм, диаметр оболочки 125 мкм, числовая апертура 0,15–0,2.

Для повышения дальности действия связи и скорости передачи информации используется градиентное профилирование показателя преломления по сечению волокна путем введения в материал световода примесей, распределение которых по площади сердцевинны и создает требуемый профиль показателя преломления. С другой стороны, введение примесей приводит к снижению радиационно-оптической стойкости световода. Поэтому вопрос о выборе того или иного типа световода решается для конкретных условий применения после экспериментальной проверки.

В экспериментах на реакторе ВИР-2М изучались три образца одномодовых световодов: два

световода с ненулевой смещенной дисперсией типа G.655 (FujikuraFutureGuide®-LA и CORNINGWL-4020718.1.2.2.3.3) и один световод со ступенчатым распределением показателя преломления типа G.652.D (FujikuraFutureGuide®-LWP). Наиболее высокой стойкостью к радиации обладает световод G.652.D. При дозе статического облучения $2,5 \cdot 10^3$ Гр коэффициент наведенных потерь составил 40 дБ/км. У двух других образцов наведенные радиацией потери достигали 45 дБ/км при $D_\gamma = 1,8 \cdot 10^3$ Гр. При импульсном облучении для всех образцов уровень наведенных потерь 100 дБ/км был достигнут уже при $D_\gamma = 70$ Гр.

Одной из задач, с которой часто приходится сталкиваться в экспериментах на импульсных реакторах, является обеспечение вывода аналогового оптического сигнала из зоны облучения с высоким уровнем радиации ≤ 107 Гр/с. Сотрудниками Центра волоконной оптика при ИОФ РАН разработана технология изготовления кварцевого стекла КС-4В и волоконных световодов на его основе, а также технология насыщения этого стекла ионами водорода [9], что оказалось весьма эффективным для повышения стойкости световода к воздействию радиации. Измерение наведенного поглощения в световодах на основе кварцевого стекла КС-4В, выполненное в экспериментах на импульсном реакторе ВИР-2М, показало, что они сохранили свое пропускание в ближнем ИК диапазоне спектра при $D_\gamma = 1 \cdot 10^4$ Гр.

Ослабление аналогового оптического сигнала при выводе его из зоны облучения, связанное с поглощением в волокне на уровне 30–100 дБ/км, может быть учтено и компенсировано при использовании так называемой контрольной петли. Этот способ коррекции выводимой информации был запатентован [16] в процессе отработки бесконтактных волоконно-оптических методов измерения температуры оболочек твэлов, испытываемых на импульсном реакторе БИГР [17].

Заключение

Из наиболее актуальных областей научно-технического применения оптоэлектронных схем, где необходима проверка оптических материалов и световодов на радиационную стойкость, можно выделить следующие:

– контроль за состоянием активных зон статических и импульсных реакторов, а также управление системами автоматики, расположенными внутри и вблизи активных зон;

– вывод информации из мест облучения образцов и приборов при проведении на ядерных реакторах экспериментов по определению уровня их радиационной стойкости;

– использование световодов в качестве передающей линии в нейтронных детекторах на основе ядерно-оптических преобразователей [18];

– использование волоконных линий и других оптических элементов в космических аппаратах;

– диагностика различных параметров в установках на основе управляемого термоядерного синтеза (например, термоядерный реактор ИТЭР);

– использование волоконных линий в устройствах военного назначения.

Разработанные во ВНИИЭФ для экспериментов на ИЯР методики позволяют изучать кинетику процессов образования и отжига радиационных дефектов, ответственных за поглощение светового излучения в оптических материалах, и прогнозировать поведение материалов в условиях импульсного облучения. Последнее обстоятельство имеет большое значение, так как наши исследования показали, что данные по радиационно-оптической стойкости материалов, полученные при статическом облучении, неприменимы в условиях импульсного облучения.

Исследования по воздействию приносящих излучений на оптические материалы, выполненные во ВНИИЭФ и других лабораториях, позволили провести целенаправленные работы по повышению их радиационной стойкости, т.е. разработать технологии изготовления материалов с низкими коэффициентами наведенного поглощения. Так, в результате разработки технологии изготовления кварцевого стекла с предельно низким содержанием примесей изготовлены световоды, которые могут быть использованы для вывода света видимого диапазона при дозах ~ 107 Гр [9], что соответствует годовой дозовой нагрузке внутри активной зоны стационарного реактора.

Образование в световодах под действием радиации точечных дефектов, ответственных за поглощение света, можно использовать в дозиметрии ионизирующих излучений [11,19,20]. Для обеспечения радиационной чувствительности кварцевое стекло световода легируется элементами, которые под действием ионизирующего излучения образуют большие концентрации долгоживущих дефектов. Например, в ИОФ РАН (г. Москва) разработаны технологии радиационно-чувствительных световодов различных типов, в том числе световодов для внутриреакторных применений, позволяющих измерять большие дозы [11,19].

Список литературы

1. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Смирнов И. Г., Воинов М. А., Девяткин А. А., Кошелев А. С., Нарожный А. Т., Никитин И. А., Хоружий В. Х. Критические стенды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии, Саров, 2011, вып.1, с. 136–164.

2. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко В. А., Басманов В. Ф., Балакин В. А., Горностаев-Польский С. А., Гришин А. В., Грунин А. В., Макеев Н. Г., Михайлов Е. С., Мысков Г. А., Назаренко С. Т., Пунин В. Т., Румянцев В. Г., Тельнов А. В., Эльяш С. Л. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии, Саров, 2011, вып.1, с. 165–191.

3. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.

4. Melnikov S. P., Sizov A. N., Sinyanskii A. A., Miley G. H. Lasers with nuclear pumping. New York: Springer, 2015.

5. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривоносов В. Н., Мельников С. П., Синянский А. А. Методическое обеспечение исследований по радиационной стойкости оптических элементов лазеров с ядерной накачкой. – Труды 2-й международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Арзамас-16, 1995, т.1, с.52–69.

6. Бабичева Т. А., Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Павловская Л. М., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой на жидких активных средах. – Труды отраслевой конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Обнинск, 1993, т.3, с.146–155.

7. Сизов А. Н. Распространение света через жидкость, возбуждаемую осколками деления. – Труды 2-й международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Арзамас-16, 1995, т.1, с.397–398.

8. Woody F. P., Prelas M. A. Transient radiation-induced absorption in fused-silica optical fibers, 450–950 nm. – Труды отраслевой конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Обнинск, 1993, т. 3, с. 32–40.

9. Заитов Ф. А., Литвинова Н. Н., Савицкий В. Г., Средин В. Г. Радиационная стойкость в оптоэлектронике. М., Воениздат, 1987.

10. Miley G. H. Influence of high-intensity radiation on optical materials for nuclear diagnostics/

control systems. – Int. Embedded Topical Meeting on Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors, Washington, 1994, p.172–178.

11. Tomashuk A. L., Golant K. M. Radiation-resistant and radiation-sensitive silica optical fibers. – Proceedings SPIE, 2000, v. 4083, p. 188–201.

12. Сахаров В. В., Басков П. Б., Федоров В. Д., Степанов В. А., Степанов П. А. Бескислородные оптические материалы для радиационной оптики. – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2004, вып. 1(62), с. 231–244.

13. Cheymol G., Brichard B., Villard J. F. Fiber optics for metrology in nuclear research reactors – applications to dimensional measurements. – IEEE Trans. Nucl. Sci., 2011, v.58, No.4, p.1895–1902.

14. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 1999.

15. Голубева О. А., Довбыш Л. Е., Лебедев С. Н. и др. Система цифровой регистрации в исследованиях радиационной стойкости элементов оптоэлектроники на импульсном ядерном реакторе. – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на РЭА, 1990, вып. 3, с. 29–31.

16. Довбыш Л. Е., Сеницын А. В., Горбунов В. В., Голубева О. А., Лебедев С. Н. Способ измерения температуры в областях с ионизирующим излучением. – Патент № 2386113 от 24.02.09 (приоритет 2009106266 от 24.02.09).

17. Устиненко В. А., Богданов В. Н., Воронцов С. В., Горбунов В. В., Колесов В. Ф., Лычагин А. К., Сажнов В. В., Софронов В. Н., Тесаловский Н. А. Поведение образцов микротвэлов при воздействии нейтронного импульса реактора БИГР. – Атомная энергия, 2014, т. 116, вып. 1, с. 20–26.

18. Горбунов В. В., Довбыш Л. Е., Мельников С. П., Сеницын А. В., Синянский А. А., Цветков В. М. Нейтронный детектор на основе ядерно-оптического преобразователя. – Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007, вып. 11, с.169–179.

19. Томашук А. Л. Волоконно-оптические дозиметры. – Фотон-экспресс, 2005, № 7(47), с.53–55.

20. O’Keefe S., Fitzpatrick C., Lewis E., Al-Shamma A. I. A review of optical fiber radiation dosimeters. – Sensor Rev., 2008, v.28, No.2, p. 136–142.