

**СОВМЕСТНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОИЯИ И БГТУ  
ПО РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ НЕЙТРОНОВОДНЫХ И ДЕТЕКТОРНЫХ СИСТЕМ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ИБР-2**

Ю.Г. Павлюкевич, Г.Е. Рачковская, А.П. Кравчук,  
Е.Е. Трусова, М.В. Дяденко, Г.Б. Захаревич, Е.В.Третьяк  
*Белорусский государственный технологический университет*

С.А. Куликов, М.В. Булавин

*объединенный институт ядерных исследований*

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) является крупнейшим в мире международным научным центром. В состав ОИЯИ входят семь лабораторий в рамках исследовательской деятельности, которых реализуются проекты, связанные с крупными экспериментальными установками.

В Лаборатории нейтронной физики имени И.М.Франка (ЛНФ) в качестве эффективного инструмента исследований структуры и динамики конденсированных сред, включая: кристаллы и наносистемы, функциональных материалов, сложных жидкостей и полимеров, горных пород, используются нейтроны. Результаты исследовательских работ востребованы в молекулярной биологии и фармакологии, технической диагностике и в других областях науки и техники. Так же в ЛНФ проводятся фундаментальные исследования нейтрона как элементарной частицы. Основной исследовательской установкой, вокруг которой группируется деятельность ЛНФ является уникальный реактор ИБР-2. Благодаря техническим решениям ИБР-2 обеспечивает генерацию одного из самых высоких потоков нейтронов у замедлителя в мире:  $\sim 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>/с с 1850 МВт пиковой мощности. При этом ИБР-2 отличается низким потреблением ресурсов, например топлива, необходимым для своей работы, более экономичен и экологичен в сравнении с другими реакторами.

Наряду с реактором в состав комплекса оборудования, деятельность которого направлена на решение определенного класса исследовательских задач входят: спектрометры, важной частью, которых являются детекторы, системы окружения образца, позволяющие создавать различные условия на образце (температуру, магнитное поле и др.), нейтроноводы и нейтрон-оптические системы, системы управления и автоматического сбора данных и др. [1].

Расширение спектра, научно-исследовательских задач, обуславливает необходимость дальнейшего развития научно-исследовательских систем реактора ИБР-2.

Специалистами ОИЯИ и кафедры технологии стекла и керамики БГТУ проведены совместные комплексные исследования в области разработки материалов для нейтронных и детекторных систем реактора ИБР-2.

Нейтронные системы используются для проведения пучков тепловых (холодных) нейтронов от активной зоны реактора на большие расстояния к измерительному оборудованию. Зеркальный нейтронный канал представляет собой изогнутый канал, помещенный в вакуумированный стальной кожух, позволяющий избежать потерь интенсивности из-за рассеяния и поглощения нейтронов в воздухе. Нейтроны в канале движутся по дуге окружности, испытывая полное внутреннее отражение отполированных внутренних стенок. Канал собирается из секций, склеенных из боросиликатных стеклянных пластин, на отражающую поверхность которых нанесен слой из изотопа  $^{58}\text{Ni}$ , обеспечивающий максимальный угол полного внутреннего отражения. Однако, стеклянные пластины борофлюат не выдерживают воздействие сильных полей ионизирующих излучений, поэтому зеркальный участок нейтронного канала располагается на некотором расстоянии от реактора ИБР-2. В результате уменьшается плотность потока нейтронов, что снижает эффективность всей нейтронной системы и не позволяет использовать ее возможности в полной мере. В этой связи актуальной является разработка новых составов радиационно-стойких стекол, способных выдерживать сильные поля ионизирующих излучений в течение длительного периода.

Для решения этой задачи в условиях лаборатории высокотемпературного синтеза БГТУ синтезированы бесщелочные и малощелочные алюмосиликатные стекла в области системы бесщелочных  $\text{RO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , где R –  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , ограниченной содержанием, мас. %:  $\text{SiO}_2$  55–65;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 10–20;  $\text{CaO}$  – 10–15;  $\text{MgO}$  – 7,5;  $\text{ZnO}$  – 2,5. Улучшение технологических характеристик стекол обеспечивали добавлением 2 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}$  сверх 100 %. Для повышения радиационной стойкости составы стекол модифицировали путем введения оксидов  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  в количестве 2 мас. % сверх 100 %. Также для сравнения синтезированы щелочноборосиликатные стекла в системе  $\text{R}(\text{Na}, \text{K})_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  составов N-ZK7, N-BK7, S-BSL7, которые изучены в работе [2] и их отечественный аналог K208.

С использованием современного оборудования БГТУ: ИК-микроскопа Nicolet iN10, микротвердомера Wolpert Wilson Instruments 402 MVD, дилатометра Netzsch DIL 402 PC, спектрофотометра фотоэлектрического PROSKAN MC-122, полярископа-поляриметра ПКС-250М проведены исследования структуры и свойств стекол: плотности, микротвердости, ТКЛР, цветовых характеристик, светопропускания, наличия напряжений до и после облучения нейтронами с различными значениями флюенса, определены характеристические температуры. На основе расчетов линейного коэффициента ослабления, толщины слоя половинного ослабления, относительного поглощения тепловых нейтронов, гамма и рентгеновского излучения выявлена высокая способность к поглощению нейтронов борсодержащими стеклами.

Облучение образцов экспериментальных стекол осуществлялись в ЛНФ им. И.М. Франка на установке для радиационных исследований ИБР-2 в течение 1 цикла ее работы (22 суток) при различных значениях флюенса 1014, 1015, 1016, 1017, 1018 см<sup>-2</sup>.

Выявлено, что образцы испытанных стекол устойчивы к воздействию излучений (нейтронов) высоких энергий. Разрушения образцов, появления трещин и изменения окраски образцов, облученных нейтронами со значением флюенса 10 см<sup>-13</sup>, не наблюдается. Образцы стекол марки К208, которые подвергались воздействию нейтронов со значениями флюенса от 1014 до 1017 см<sup>-2</sup>, изменили окраску, причем с увеличением величины флюенса интенсивность окраски возрастала.

При нейтронном облучении флюенсом 1018 см<sup>-2</sup> стекла, характеризуются высокой активностью, что согласно результатам исследований в ЛНФ обусловлено образованием изотопов церия и цинка. В этой связи для апробации предложен состав радиационно-стойкого стекла, в котором CeO<sub>2</sub>, ZnO исключены, путем их замещения на оксиды Na<sub>2</sub>O или SiO<sub>2</sub>.

Не менее важным направлением сотрудничества ОИЯИ и БГТУ являлась разработка стекол для детекторных систем. Это обусловлено тем, что наряду с нейтронводами важнейшей частью спектрометров являются детекторы нейтронов, с помощью которых определяют интенсивность потока нейтронов, его энергетический спектр и другие характеристики. Используемые детекторы должны стабильно работать в интенсивных радиационных потоках, характеризоваться высокой скоростью счета, эффективностью регистрации и разрешающей способностью [1].

В настоящее время существует большое разнообразие неорганических материалов, используемых для изготовления сцинтилляционных детекторов, наибольшее распространение среди которых находят монокристаллы. Значительно более дешевыми по сравнению с моно-

кристаллическими образцами являются сцинтилляционные детекторы на основе стеклянных матриц. Сцинтилляционные стекла также обладают возможностью приобретать желаемую форму любых размеров, например, пластин, дисков, трубок и тонкого оптического волокна.

Для изготовления сцинтилляционных детекторов нейтронов перспективными являются литийсодержащие стекла [3]. Определяющее влияние на чувствительность этих стекол к нейтронам обуславливается видом и количеством активатора, соотношением других компонентов в составе стекол. Преимущественно в качестве активатора используется церий, который в стекле находится в степенях окисления +3 и +4. Присутствие ионов  $C^{+4}$  снижает чувствительность стекол. С целью снижения влияния и, если возможно, устранения этого эффекта требуется разработка и исследование составов литийборсодержащих стекол для применения в сцинтилляционных детекторах нейтронов, в которых обеспечивается стабилизация церия в степени окисления +3, либо в качестве активатора взамен церия используются ионы европия.

На кафедре технологии стекла и керамики БГТУ проведены исследования, направленные на получение перспективных стекол для сцинтилляционных детекторов нейтронов. Синтезированы стеклянные матрицы на основе стеклообразующих систем  $Li_2O-B_2O_3$  и  $Li_2O-B_2O_3-Gd_2O_3$ , активированных ионами церия и европия. Исследованы их спектрально-люминесцентные свойства стекол. Показана зависимость оптических характеристик от состава стекол и количества вводимого активатора. Полученные образцы стекол переданы на испытания в ЛНФ ОИЯИ для оценки эффективности их применения в сцинтилляционных детекторах нейтронов.

Таким образом, в результате совместного сотрудничества ОИЯИ и БГТУ обеспечивается эффективное решение задач по разработке материалов для нейтронных и детекторных систем реактора ИБР-2, что позволит расширить научно-исследовательские возможности комплекса оборудования ЛНФ.

### Литература

1. Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка [Электронный ресурс] / Буклет ЛНФ // под ред. С.А. Куликова. – Дубна. – Режим доступа: <http://flnph.jinr.ru/ru/user-club>.
2. Boffy, R. Design of a new neutron delivery system for high flux source / R. Boffy. – Madrid: Universidad Politecnica de Madrid, 2016. – 158 p.
3. Сцинтилляционные детекторы нейтронов на базе  $6Li$ - силикатного стекла, активированного церием / Б.В. Шульгин [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 8. – С. 1364–1368.