

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОНИТОРЫ УСЛОВИЙ ВЫСОКОДОЗНОГО И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В.А. Степанов¹, Е.И. Исаев¹, Л.М. Крюкова^{2,3}, О.А. Плаксин^{1,4},
П.А. Степанов^{1,5}, В.М. Чернов^{2,3}

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

²Национальный исследовательский ядерный университет
«Московский инженерно-физический институт».
115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31.

³Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов им. А.А. Бочвара.
123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а.

⁴ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского.
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1

⁵Обнинское научно-производственное предприятие «Технология».
249031, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 15



Исследованы радиационные изменения структуры и свойств оксидных и нитридных диэлектрических материалов. Обосновано применение высокотемпературных диэлектрических материалов в качестве мониторов температуры внутриреакторного облучения материаловедческих сборок. Экспериментально показано, что использование монокристаллического Al_2O_3 и керамик из BN позволяет определять температуру облучения в диапазоне от 370 до 1900 К. Температурные условия облучения определяются с помощью измерений интенсивности оптического поглощения или смещений линий в рентгеновских спектрах материалов от температуры пострadiационного отжига. Обсуждается возможность детектирования поглощенной γ -дозы по интенсивности оптического поглощения и люминесценции F-центров облученных монокристаллов Al_2O_3 , а дозы облучения нейтронами – с помощью измерений изотопного состава материалов из BN.

Ключевые слова: радиационное материаловедение, реакторное облучение, диэлектрики, структурные исследования, оптические исследования, мониторы температуры и дозы.

ВВЕДЕНИЕ

Определение условий высокотемпературного и высокодозного облучения материалов в активных зонах ядерных реакторов является важной и актуальной задачей экспериментального радиационного материаловедения. Такой мониторинг особенно важен для энергетических реакторов, в которых локальные условия облучения материалов (температура, доза) определяются расчетными методами (при заданных мощности ре-

© В.А. Степанов, Е.И. Исаев, Л.М. Крюкова, О.А. Плаксин, П.А. Степанов, В.М. Чернов, 2015

актора, нейтронных и γ -спектрах, теплообмене, др.) или пассивными методами с использованием различных мониторов облучения, изготовленных из специальных материалов. Исследования радиационных изменений структуры, свойств и изотопных составов мониторов позволяют получать характеристики условий (доза, температура) облучения.

Радиационно-наведенные изменения структуры (дефекты разных типов) и свойств материалов зависят от условий облучения (температуры, дозы). При длительном стационарном радиационном воздействии в материале накапливаются лишь те повреждения, которые отжигаются при температурах, превышающих температуру облучения. По изменению зависимости некоторой структурно-чувствительной физической характеристики материала $A(T)$ от температуры пострадиационного отжига имеется возможность определения температуры облучения этого материала (рис. 1). Применение такого метода определения температуры облучения радиационных испытаний малоэффективно в случае, когда температура существенно меняется в процессе облучения. Характер изменения физической характеристики $A(T)$ отражает лишь заключительный температурный режим облучения. Однако в случае заведомо стационарных температурных условий метод может быть весьма полезным, особенно в сочетании с дополнительными способами определения температуры, например, использованием плавких материалов (плавкие мониторы температуры), а также расчетными методами.

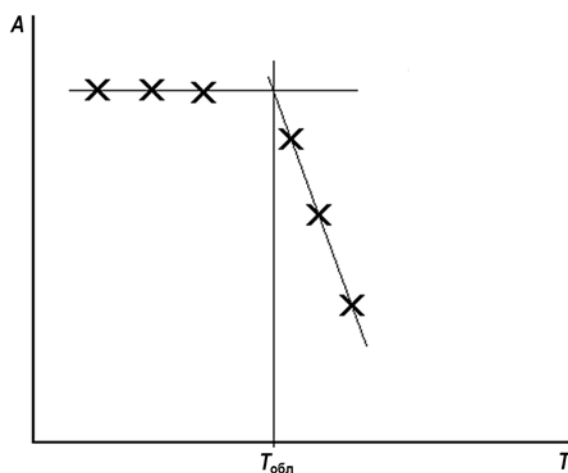


Рис. 1. Определение температуры облучения с помощью измерений физической характеристики A материала-монитора после изотермических отжигов

В данной работе обосновывается возможность применения высокотемпературных диэлектрических материалов в качестве мониторов отжига условий облучения в широком диапазоне температур и доз. Метод определения условий внутриреакторного облучения основан на изучении радиационно-индуцированных изменений структуры и связанных с ними физических свойств диэлектриков после облучения.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОНИТОРЫ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ

Для получения информативной зависимости $A(T)$, включающей в себя искомую температуру облучения, необходим широкий температурный интервал хорошо измеряемых изменений структуры и физических свойств облученного материала монитора. В высокотемпературных диэлектрических материалах, как правило, химических соединениях, таких как Al_2O_3 , MgO , $MgAl_2O_4$, BN , Si_3N_4 , SiC , с температурами плавления от 2000 (нитрид кремния) до 3000 К (нитрид бора) температурный интервал

отжига радиационных структурных повреждений оказывается значительно шире по сравнению с металлами и может простирается вплоть до температур плавления материалов мониторов. Это связано с тем, что радиационное облучение в таких материалах приводит не только к появлению различных кристаллических дефектов, как в металлах, но и к образованию локальных областей нестехиометрии и даже включений фаз с измененной кристаллической структурой [1]. Важным является также то, что диэлектрические мониторы отжига можно анализировать по широкому набору измерений структурно-чувствительных физических характеристик $A(T)$. В этот набор могут входить измерения диэлектрических проницаемости и тангенса потерь, люминесценции, оптического поглощения в ультрафиолетовой и ближней ИК-областях спектра, электросопротивления и др. Для изучения изменений фазового состава и стехиометрии в диэлектриках после облучения можно применять как рентгенографию, так и методы колебательной спектроскопии [2, 3].

В качестве примера можно привести оптические измерения широкозонного высокотемпературного диэлектрика Al_2O_3 (лейкосапфир). В монокристаллах лейкосапфира в результате радиационного облучения образуются нестехиометричные по кислороду микрообласти и оптически активные вакансионные центры (F -центры) [4]. Типичные спектры радиационно-наведенного поглощения монокристаллов Al_2O_3 показаны на рис. 2. Исследовалось влияние термического отжига на оптическое поглощение, наведенное в монокристаллах Al_2O_3 при реакторном облучении (реактор БР-10, ГНЦ РФ-ФЭИ). Облучение с дозой $1,5 \cdot 10^{21}$ н/см² приводило к появлению фонового поглощения в диапазоне длин волн 215 – 560 нм и полос оптического поглощения при 413, 256, 227 и 205 нм. При термическом отжиге изменения оптического поглощения происходили при температурах от 350 до 900 К. Температура начала отжига полосы 413 нм соответствовала температуре, при которой монокристаллы выдерживали после реакторного облучения.

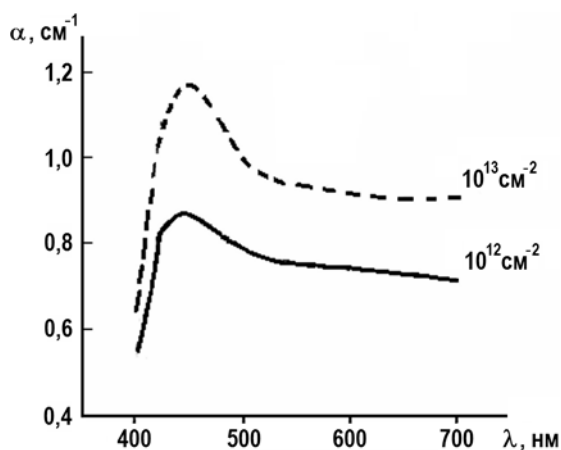


Рис. 2. Спектры поглощения монокристалла Al_2O_3 , облученного ионами Kr^+ (210 МэВ, 300 К)

Возникающие во время нейтронного облучения кислородные вакансии под действием ионизирующего облучения меняют свой электрический заряд, образуя F^+ - и F -центры, которые представляют собой, соответственно, однократно положительно заряженные и нейтральные вакансии по кислороду. Они обуславливают указанные полосы поглощения при 205 – 256 нм, а также фотолюминесценцию при 413 нм (F -центры) и 328 нм (F^+ -центры) [4]. Это позволяет по измерениям интенсивности оптического поглощения и люминесценции детектировать также поглощенную γ -дозу. Наблюдались связанные с γ -облучением изменения формы спек-

ров поглощения корунда вблизи фундаментального края поглощения 200 – 300 нм начиная с температуры отжига 370 К.

BN-МОНИТОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

Графитоподобный нитрид бора получают в виде керамики методами горячего прессования или реакционного спекания путем отжига в атмосфере азота спрессованной смеси порошков бора и турбостратного нитрида бора [7] и в виде пиролитических слоев методом химического газофазного осаждения реагентов BF_3 (BCl_3) и NH_3 [8]. Керамический нитрид бора является изотропным материалом с размером зерен-кристаллитов в интервале 100 – 1000 нм. Пиролитический нитрид бора является сильнотекстурованным нанокристаллитным материалом с характерной структурной иерархией [9]. Агрегаты размером до 2000 нм состоят из зерен размером ~ 100 нм, которые в свою очередь состоят из слабаразориентированных кристаллитов размером 30 – 60 нм (рис. 3).

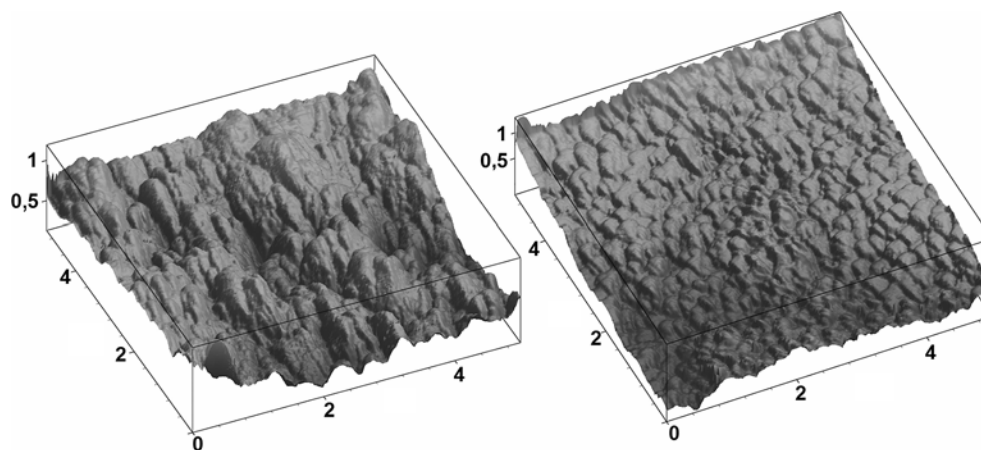


Рис. 3. Атомно-зондовая микроскопия (5×5 мкм) пиролитического нитрида бора до (слева) и после (справа) облучения ионами аргона (18 кэВ, 660 К, 25 мкА/см²)

Особенность кристаллического строения графитоподобного BN заключается в наличии изоморфных фаз с различающимися межплоскостными расстояниями. Их можно представить как нарушения последовательности правильной укладки базисных плоскостей гексагональной фазы $AA'AA'$ и появление дефектов упаковки типа $AA'BAA'$, по сути, являющихся фрагментами ромбоэдрической фазы [5]. Различные фазы могут когерентно сочленяться в пределах одного кристаллита. Такая особенность кристаллического строения приводит к тому, что дифракционные максимумы (002) и (004) на рентгенограммах пиролитического нитрида бора имеют сложную структуру и даже могут расщепляться на несколько узких линий, соответствующих изоструктурным фазам с различными межплоскостными расстояниями [6,10]. Неравновесные условия синтеза и радиационное облучение приводят к значительному увеличению типов изоморфных фаз в структуре графитоподобного BN и, как следствие, к значительному уширению и сдвигу в область малых углов рентгеновских линий (002) и (004). Это позволяет уверенно сопоставлять условия облучения и структуру мониторов отжига из BN. Важно, что диапазон структурной релаксации в условиях отжига графитоподобных структур BN простирается до высоких температур. Наблюдались изменения положения дифракционного максимума (002) различных керамических и пиролитических материалов при температурах отжига от 500 до 1900 К.

Реакторное облучение (реактор БР-10, ГНЦ РФ-ФЭИ) керамических и пиролитических образцов BN проводили до дозы $1,5 \cdot 10^{21}$ н/см² при температуре 670 – 690 К в инертной атмосфере (аргон). Структурные изменения после облучения и отжигов фиксиро-

вались по форме и положению линии (002) на рентгеновских дифрактограммах (рис. 4). Облучение приводит к смещению центра тяжести линии (002) пиролитических образцов в область малых углов. Непосредственно после облучения проявляется также ее сложная структура, свидетельствующая о наличии в материале изоморфных фаз с несколько различающимися межплоскостными расстояниями. После отжига сложная структура линии (002) пиролитических материалов сохранялась. Изменения положения рентгеновского максимума (002) керамических образцов аналогичны. Определение температуры облучения по результатам рентгеновских измерений показано на рис. 5.

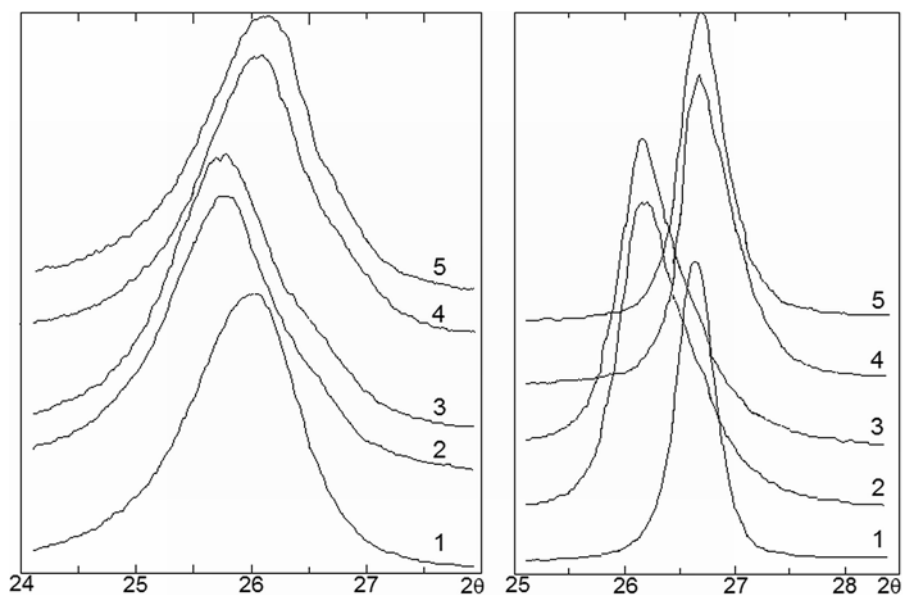


Рис. 4. Профиль рентгеновского ($\text{Cu-K}\alpha$ -излучения) максимума (002) пиролитического (слева) и керамического (справа) BN: 1 – исходного; 2 – после реакторного облучения; 3 – после отжига при 770 К; 4 – при 1770 К; 5 – при 1870 К

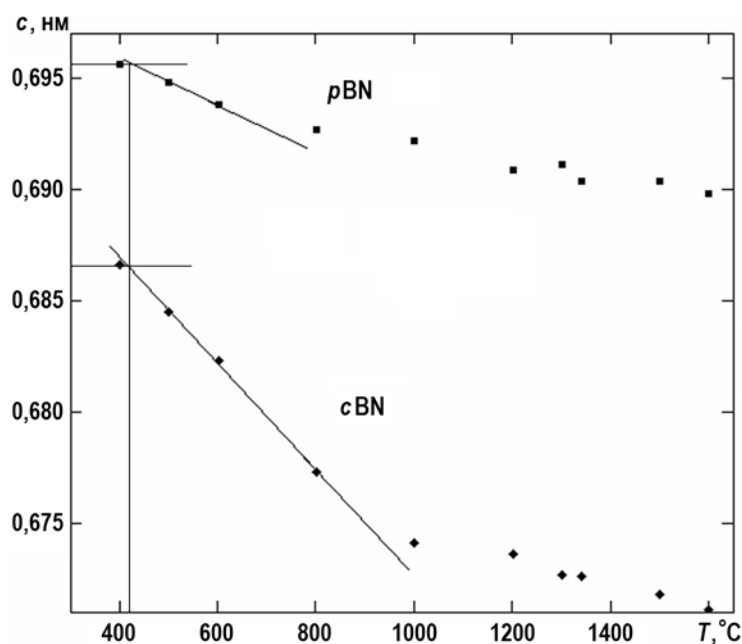


Рис. 5. Определение температуры облучения по изменению межплоскостного расстояния с керамического (cBN) и пиролитического (pBN) нитридов бора с температурой отжига T

Интересно, что максимум линии (002) как у пиролитических, так и у керамических образцов после отжига при 1770 – 1870 К оказался смещенным в область больших углов (уменьшение межплоскостного расстояния) по сравнению с его положением у исходных материалов. Это свидетельствует о структурном упорядочении по сравнению с исходным состоянием материалов после облучения и отжига. По данным [6, 9, 10] электронное и γ -облучение не вызывает структурных изменений в нитриде бора, так что в рентгеновских измерениях мониторы отжига на его основе пригодны для определения температур чисто повреждающего (нейтронного, ионного) радиационного воздействия.

Измерения оптического поглощения графитоподобного нитрида бора также возможны, но при использовании тонких (толщиной до 100 мкм) пиролитических пластин. Реакторное облучение увеличивает оптическое поглощение пиролитического BN в ультрафиолетовой и видимой частях спектра. В спектрах поликристаллических материалов часто присутствует значительная фоновая составляющая, связанная с рассеянием и имеющая характерный спектр с ростом поглощения в коротковолновой области. Для выявления индуцированных облучением оптических центров необходима обработка получаемых спектров с учетом такого фона. Когда размер областей рассеяния много меньше длины волны света, спектральный ход коэффициента фоновых потерь $\alpha(\lambda)$ в видимом диапазоне описывается с помощью теории рассеяния Рэлея [11]

$$\alpha = Kr^3 \cdot \lambda_0^4 / (\lambda^2 - \lambda_0^2)^2,$$

где r – размер кристаллитов (областей когерентного рассеяния света); λ_0 – длина волны света, соответствующая ширине запрещенной зоны; K – величина, зависящая от физических констант вещества. При обработке спектров поглощения облученного и необлученного пиролитического материала получена величина $r \sim 40$ нм. Размеры когерентно рассеивающих областей в облученном и необлученном нитриде бора совпали между собой. Они также совпали с характерным минимальным размером элементов наноструктуры (см. рис. 3). Примечательно, что облучение приводит к упорядочению наноструктуры материала, не изменяя ее минимальный по размеру элемент.

Вычет полученного расчетным путем спектра фона позволяет получить истинный спектр радиационно-наведенного поглощения в пиролитическом BN (рис. 6). Радиационно-индуцированные центры поглощения при 600 – 700 и 490 нм отжигаются в диапазоне температур 700 – 1300 К, но дефекты, ответственные за поглощение 435 нм, полностью не отжигаются даже при 2000 К. Согласно [6], отжиг при $T > 1300$ К восстанавливает исходные значения коэффициента оптического пропускания облученного нейтронами пиролитического материала.

При измерениях электрофизических характеристик мониторов отжига из BN необходимо учитывать, что диэлектрическая проницаемость и тангенс потерь практически не чувствительны к облучению нейтронами до доз $D \leq 10^{20}$ см⁻² [6]. Отжиг при $T > 1300$ К облученного с большими дозами пиролитического нитрида бора восстанавливает исходные значения диэлектрических потерь.

BN-МОНИТОРЫ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

Материалы из BN можно использовать для определения дозы облучения нейтронами на основании анализа изменений относительного содержания в них изотопов B^{10}/B^{11} и Li^7 вследствие ядерных трансмутаций. В результате (n, α)-реакции изотоп B^{10} , природное содержание которого во всех борсодержащих материалах составляет 19%, превращается в Li^7 . Пример изменения изотопного состава керамики из графитоподобного BN после реакторного облучения приведен на рис. 7. Из

масс-спектра можно определять изменения интенсивностей линий B^{10} , B^{11} и Li^7 .

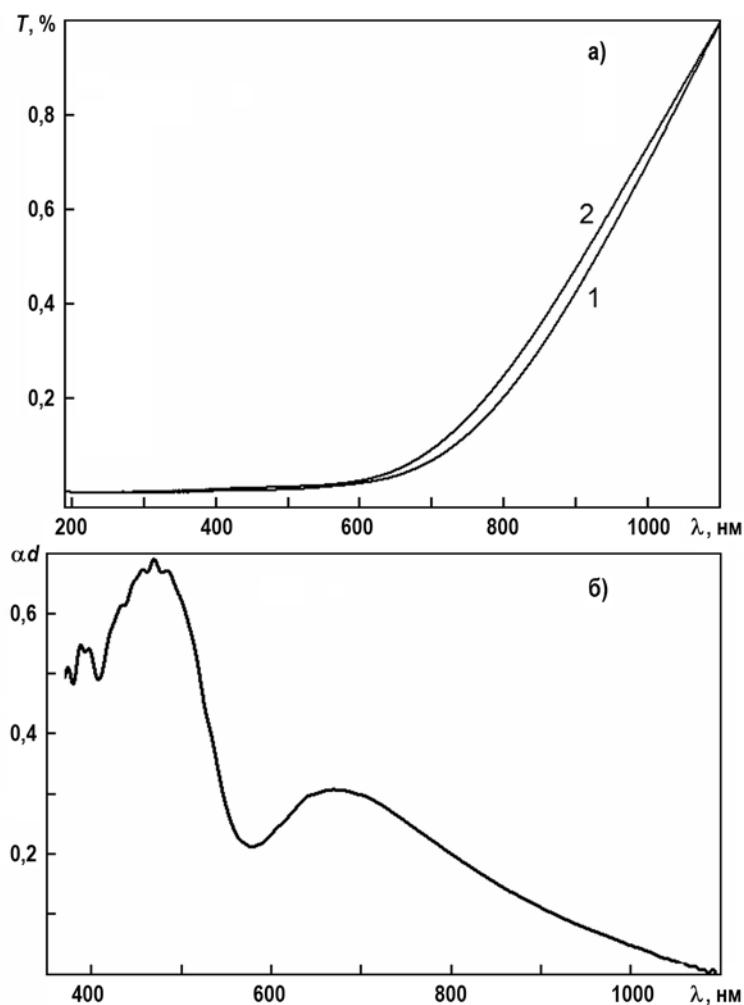


Рис. 6. а) оптические спектры пропускания пиролитического BN до (1) и после (2) облучения протонами (300 – 400 K, 7 МэВ, доза $5,2 \cdot 10^{15} \cdot \text{см}^{-2}$); б) расчетный спектр радиационно-наведенной оптической плотности (αd)

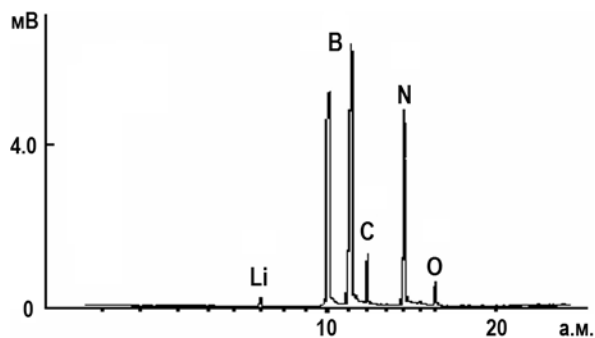


Рис. 7. Масс-спектры облученной нейтронами ($E > 0,1$ МэВ, доза $1,47 \cdot 10^{21} \cdot \text{см}^{-2}$) керамики BN

Выгорание B^{10} можно определять с помощью ИК-спектроскопии. В токе фтора при комнатной температуре происходит разложение гексагонального BN с образованием BF_3 . Проводится измерение ИК-спектров пропускания образовавшегося газа в диапазоне волновых чисел $1300 - 1600 \text{ см}^{-1}$, в котором расположены полосы

поглощения валентных колебаний молекулы BF_3 (рис. 8). Колебания изотопов бора в спектре хорошо разделены, так как изотопный сдвиг частот колебаний составляет 50 см^{-1} . Относительное содержание $\text{B}^{10}/\text{B}^{11}$ соответствует относительной интенсивности поглощения полос $1505/1455 \text{ см}^{-1}$. Химического разложения BN можно добиться и в потоке хлора, но при температуре красного каления. Измерение ИК-спектров в этом случае необходимо проводить в диапазоне волновых чисел $900 - 1050 \text{ см}^{-1}$. Содержание $\text{B}^{10}/\text{B}^{11}$ определяется по интенсивности поглощения на частотах валентных колебаний изотопов в BCl_3 1010 и 950 см^{-1} .

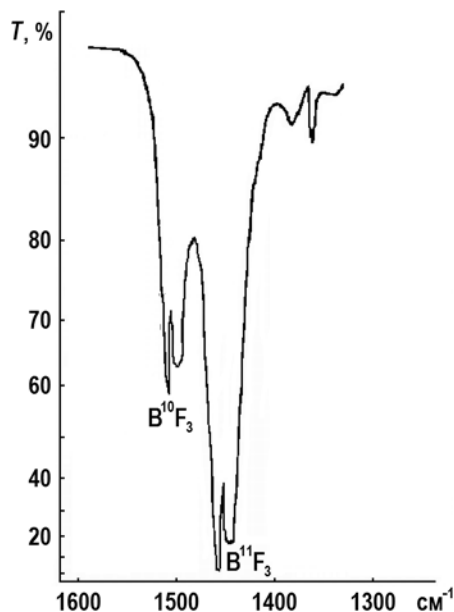


Рис. 8. ИК-спектр пропускания газа BF_3 с природным содержанием изотопов бора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа результатов исследований и известных данных по радиационным изменениям структуры и свойств высокотемпературных диэлектрических материалов (Al_2O_3 , BN) показана возможность их применения в качестве мониторов условий радиационного (реакторного) облучения материаловедческих сборок в широком диапазоне температур и доз. Температура облучения в материаловедческой сборке определяется по изменению зависимости структурно-чувствительных физических характеристик материалов от температуры пострадиационного отжига.

2. Показана возможность определения температуры реакторного облучения в диапазоне от 350 до 900 K по измерениям спектров оптического поглощения при 400 – 500 нм, а также поглощенной γ -дозы по интенсивности поглощения и люминесценции F-центров облученных монокристаллов Al_2O_3 .

3. Использование мониторов из керамического или пиролитического BN позволяет определять условия радиационных испытаний в температурном диапазоне 500 – 1900 K по сдвигу линий (002) на рентгеновских дифрактограммах, который связан со структурной релаксацией и изменением содержания изоморфных фаз в графитоподобной кристаллической структуре.

4. Показана возможность определения температуры реакторного облучения в диапазоне температур 700 – 1300 K по измерениям спектров радиационно-наведенного оптического поглощения пиролитического BN при 500–700 нм с учетом спектрального хода фоновых потерь на рассеяние, связанных с наноструктурой материала.

5. Материалы из BN можно использовать для определения дозы облучения нейтронами с помощью измерений относительного содержания в них изотопов B^{10}/B^{11} и Li^7 методами масс-спектропии и колебательной спектроскопии.

Литература

1. *Stepanov V.A., Chernov V.M.* Radiation-induced processes and their influence on the functional properties of dielectrics for different types of irradiation. // Journal of Nuclear Materials. 2000. Vol. 283-287. PP. 932-936.
2. *Plaksin O.A., Stepanov V.A., Stepanov P.A., Chernov V.M., Skuratov V.A., Krukova L.M., Polyakov A.M.* Structural transformations and properties deterioration of dielectric materials under irradiation. // Plasma Devices and Operations. 1996. Vol. 4. PP. 325-335.
3. *Chernov V.M., Belyakov V.A., Bryuzgin A.M., Cherednichenko Y.Gr., Ievleva J.I., Khorasanov G.L., Plaksin O.A., Stepanov V.A., Vizgalov A.V., Zhrebtsov V.A., Zrodnikov A.V.* Investigation on radiation-induced processes in dielectric materials. // J. Nucl. Mater. 1996. Vol. 233-237. PP. 1304-1309.
4. *Плаксин О.А., Степанов В.А.* Радиационно-индуцированные электрические и оптические процессы в материалах на основе Al_2O_3 . // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90. №4. С.612-621.
5. *Степанов В.А., Степанов П.А.* Колебательная спектроскопия материалов из графитоподобного нитрида бора. // Оптика и спектроскопия. 1995. Т.78. №3. С.431-435.
6. *Loratin V.V., Ivanov Yu.I., Dedkov V.S.* – Nanostructured Mater. 1994. Vol. 4. P. 669.
7. *Перфилов С.А., Степанов В.А., Русанова Л.Н., Кузнецова В.Ф.* Исследование графитоподобного нитрида бора методом ИК-спектроскопии. // Порошковая металлургия. 1991. №2. С.72-73.
8. *Шарупин Б.Н.* – В сб. «Химическое газофазное осаждение тугоплавких материалов». – Л.: ГИПХ, 1976. С.66-101.
9. *Buzhinskij O.I., Opimach I.V., Kabyshev A.V.* // J. Nucl. Mater. 1990. Vol. 173. P. 179.
10. *Дедков В.С., Иванов Ю.С., Лопатин В.В., Шарупин Б.Н.* Особенности строения пиролитического нитрида бора. // Кристаллография. 1993. Т. 38. №2. С. 217-221.
11. *Фабелинский И. Л.* Молекулярное рассеяние света. – М.: Высшая школа, 1965, 512 с.

Поступила в редакцию 12.12.2014 г.

Авторы

Степанов Владимир Александрович, заведующий кафедрой, доктор физ-мат.наук
E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

Исаев Евгений Игоревич, инженер
E-mail: e.isaev87@gmail.com

Крюкова Людмила Маниковна, старший научный сотрудник, доцент,
канд. физ.-мат.наук

Плаксин Олег Анатольевич, начальник отдела, профессор, доктор физ-мат.наук
E-mail: plax@mail.ru

Степанов Петр Александрович, заведующий лабораторией, доцент, канд. физ.-мат.наук
E-mail: pstep@mail.ru

Чернов Вячеслав Михайлович, главный научный сотрудник, профессор,
доктор физ-мат.наук E-mail: VMChernov@bochvar.ru

UDC 621.039.53; 537.9

DIELECTRIC MONITORS OF THE HIGH-DOSE AND HIGH-TEMPERATURE REACTOR IRRADIATION

Stepanov V.A.¹, Isaev E.I.¹, Krukova L.M.^{2,3}, Plaksin O.A.^{1,4},
Stepanov P.A.^{1,5}, Chernov V.M.^{2,3}

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Nuclear Research University «MEPhI». 1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

² National Research Nuclear University «MEPhI». 31, Kashirskoe highway, Moscow, 115409 Russia

³ A.A. Bochvar Research Institute of Inorganic Materials. 5a, Rogov st., Moscow, 123098 Russia

⁴ State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

⁵ ORPE «Technologiya». 15, Kievskoe highway, Obninsk, Kaluga reg., 249031 Russia

ABSTRACT

Radiation-induced changes of the structure of oxide and nitride dielectric materials and their properties are investigated. The use of high-temperature dielectric materials as temperature monitors

To determine the conditions of high temperature and high-dose irradiation of materials in the areas of asset of nuclear reactors is an important and urgent task of experimental radiative-insulating materials science. Such monitoring is particularly important for power reactors, in which the local irradiation conditions of materials (temperature, dose) or defined-payment methods (for a given reactor power, neutron and gamma-ray spectra, heat transfer, etc.) Or passive methods using different radiation monitors, made of special materials. Studies of radiation changes in the structure, properties and isotopic composition monitors let you receive the characteristics of the conditions (dose, temperature) irradiation.

In this paper, we substantiate the possibility of using high-dielectric-metallic materials as monitors annealing conditions of exposure in a wide range of rate and doses. Method for determination of in-core irradiation conditions based on the study of radiation-induced changes in the structure and related physical properties of dielectricians after irradiation.

Radiation induced changes of structure and physical properties of oxide and nitride dielectric materials are investigated. High-temperature dielectric materials as temperature monitors during testing of materials in the nuclear reactor are proposed. It is experimentally shown that the use of single-crystal Al_2O_3 and BN ceramics allows to determine the temperature of the radiation in the range from 370 to 1900 K. The temperature of testing is determined by measuring the intensity of the optical absorption or line shifts in X-ray spectra of the irradiated materials after annealing. We discuss the possibility of the gamma dose detecting by measuring the intensity of the optical absorption and luminescence of F-centers of irradiated Al_2O_3 single crystals, the neutron dose too, – by measuring the isotopic composition of BN materials.

Key words: radiation material science, reactor irradiation, dielectrics, structural studies, optical studies, temperature monitor, dose monitor.

REFERENCES

1. Stepanov. V.A., Chernov V.M. Radiation-induced processes and their influence on the functional properties of dielectrics for different types of irradiation. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, v. 283-287, pp. 932-936.

2. Plaksin O.A., Stepanov V.A., Stepanov P.A., Chernov V.M., Skuratov V.A., Krukova L.M., Polyakov A.M. Structural transformations and properties deterioration of dielectric materials under irradiation. *Plasma Devices and Operations*. 1996, v. 4, pp. 325-335.
3. Chernov V.M., Belyakov V.A., Bryuzgin A.M., Cherednichenko Y.Gr., Ievleva J.I., Khorasanov G.L., Plaksin O.A., Stepanov V.A., Vizgalov A.V., Zherebtsov V.A., Zrodnikov A.V. Investigation on radiation-induced processes in dielectric materials. *J. Nucl. Mater.* 1996, v. 233-237, pp. 1304-1309.
4. Plaksin O.A. and Stepanov V.A. Radiation-Induced Electrical and Optical Processes in the Materials Based on Al_2O_3 . *Optika i spektroskopiya*. 2001, v. 90, no. 4, pp. 542-551 (in Russian).
5. Stepanov V.A., Stepanov P.A. Kolebatel'naya spektroskopiya materialov iz grafitopodobnogo nitrída bora. *Optika i spektroskopiya*. 1995, v. 78, no. 3, pp. 431-435 (in Russian).
6. Lopatin V.V., Ivanov Yu.I., Dedkov V.S. *Nanostructured Mater.* 1994, v. 4, p. 669.
7. Perfilov S.A., Stepanov V.A., Rusanova L.N., Kuznecova V.F. Issledovanie grafitopodobnogo nitrída bora metodom IK-spektroskopii. *Poroshkovaja metallurgija*. 1991, no. 2, pp. 72-73 (in Russian).
8. Sharupin B.N. In «Himicheskoe gazofaznoe osazhdenie tugoplavkih materialov». Leningrad, GIPH Publ., 1976, pp. 66-101 (in Russian).
9. Buzhinskij O.I., Opimach I.V., Kabyshev A.V. *J. Nucl. Mater.* 1990, v. 173, p. 179.
10. Dedkov V.S., Ivanov Ju.S., Lopatin V.V., Sharupin B.N. Osobennosti stroenija piroliticheskogo nitrída bora. *Kristallografija*. 1993, v. 38, no. 2, pp. 217-221 (in Russian).
11. Fabelinskij I. L. Molekuljarnoe rassejanie sveta. Moscow. Vysshaja Shkola Publ., 1965, 512 p. (in Russian).

Authors

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

E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

Isaev Evgenij Igorevich, Engineer

E-mail: e.isaev87@gmail.com

Kryukova Lyudmila Manikovna, Senior Researcher, Assistant Professor,
Cand. Sci. (Phys.-Math.)

Plaksin Oleg Anatol'evich, Head of Department, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: plax@mail.ru

Stepanov Pyotr Aleksandrovich, Head of Laboratory, Assistant Professor,
Cand. Sci. (Phys.-Math.) E-mail: pstep@mail.ru

Chernov Vyacheslav Mihajlovich, Chief Scientist, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: VMChernov@bochvar.ru