

- нанотехнология» (Санкт-Петербург – Хилово, 24–30 сентября 2012 г.): тез. докл. – СПб: СПбГТИ (ТУ), 2012. – С.294–295.
6. The Influence of Detonation Nanodiamond Powder on Blood Cells. / A. P. Puzyr, D. A. Neshumayev, V. S. Bondar et all. // In Innovative Superhard Materials and Sustainable Coatings for Advanced Manufacturing / Ed. J. Lee, N. Novikov. NATO Sci. ser. II Materials, Physics and Chemistry. – 2005 – **100**. – Chapter 10. – P. 155–167
  7. Ковалев Н. Н. Холинэстеразы – биохимические механизмы адаптации гидробионтов: дисс... д-ра биол. наук. – Владивосток, 2003. – 280 с.
  8. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза как средство коррекции процессов перекисидации белков и липидов при злокачественном росте / И. В. Шугалей, Н. П. Дубяго, С. Н. Львов и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006 – Вып. 9. – С. 243–246.
  9. Дубинина Е. Е. Продукты метаболизма кислорода в функциональной активности клеток (Жизнь и смерть, созидание и разрушение). Физиологические и клинико-биохимические процессы. – СПб: Мед. Пресса, 2006. – 397 с.
  10. Лукогорская С. А. Некоторые закономерности процессов перекисидного повреждения полипептидной цепи белков различного типа: автореф... канд. хим. наук. – СПб, 2003. – 25 с.

Поступила 16.06.13

УДК 621.762.5–022.532

**А. А. Шульженко**, член-кор. НАН Украины<sup>1</sup>; **А. С. Попов**<sup>2</sup>;  
**В. Я. Гайворонский**<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук; **В. Г. Гаргин**, **А. Н. Соколов**, кандидаты  
технических наук<sup>1</sup>; **Т. А. Прихна**, член-кор. НАН Украины<sup>1</sup>, **Т. В. Басюк**, канд. техн. наук;  
**Т. Е. Константинова**<sup>3</sup>, д-р физ.-мат. наук; **А. Д. Шевченко**<sup>4</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup>Институт физики НАН Украины, г. Киев

<sup>3</sup>Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины

<sup>4</sup>Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев

## ОКСИДНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ НАНОКЕРАМИКА, ПОЛУЧЕННАЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

*Изучено влияние температуры спекания при высоком давлении на оптические свойства нанокерамики из  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG). Все эксперименты показали существенное изменение оптического отклика при изменении температуры спекания. Установлено, что большинство полученных образцов YAG -керамики обладают эффектом самофокусировки лазерного пучка. Это говорит о том, что исследуемые образцы являются перспективными материалами для применения в нелинейной оптике.*

**Ключевые слова:** керамика, иттрий-алюминиевый гранат, высокое давление, спекание, оптические свойства.

### Введение

В настоящее время во многих областях науки и техники используются различные виды керамики, которые представляют собой поликристаллические материалы. Одним из

наиболее актуальных направлений является разработка технологий создания прозрачной керамики, т.е. керамики, способной пропускать электромагнитное излучение, и, в частности, оптической керамики видимой области спектра. Прозрачные керамические материалы, созданные на основе оксидов, например, на основе  $Y_3Al_5O_{12}$  [1; 2], по многим физико-химическим свойствам, таким как термостойкость, температура плавления, механическая прочность и т. д. превосходят стекло и в ряде случаев монокристаллы, а их производство энергетически и экономически более выгодно, чем получение последних.

Как известно, чем меньше размер зерен и число дефектов, тем выше должна быть прозрачность материала. Поэтому современные методы получения прозрачных керамик основаны, главным образом, на использовании нанопорошков.

Для обеспечения высокой прозрачности материала он должен, в частности, иметь практически беспористую структуру, реализация которой является технологически сложной задачей учитывая, что наночастицы, как правило, имеют сложную морфологию (не всегда сферическую) и состоят из устойчивых трудноразрушаемых агломератов.

Еще одна сложная технологическая задача, которую приходится решать при использовании наноразмерных компонентов – это сохранение в процессе спекания нанокристаллической структуры керамики.

Эти условия трудно выполнить традиционными методами формирования керамики (шликерной литье, экструзия, статические виды прессования), поэтому актуальной задачей является использование новых методов консолидации порошков, к которым, в первую очередь, относится техника сверхвысоких давлений [3]. Как отмечается в [1], спекание при высоком давлении позволяет консолидировать нанопорошки за счет возникающих сжимающих и сдвиговых деформаций, способствующих разрушению агломератов, взаимному перемещению частиц и уменьшению пористости компактов. Этот метод является перспективным для изготовления высокоплотной керамики с одновременной возможностью управления ее структурой на наноуровне [4].

Цель данной работы – исследовать влияние температуры спекания при высоком давлении на оптические свойства нанокерамики из  $Y_3Al_5O_{12}$ .

#### Материалы и методики исследований

В качестве исходного материала для спекания керамики использовали нанопорошок иттрий-алюминиевого граната (YAG) –  $Y_3Al_5O_{12}$ .

Нанокерамика формировалась в условиях высокого давления (~ 7,5 ГПа) и температуре (300–500 °С) в течение 2,5 мин. в аппарате типа «тороид».

Спекание проводили с использованием прессовой установки ДО-043, развивающей усилие до 20 МН.

Специально разработанная схема снаряжения ячейки высокого давления (рис. 1) обеспечила сохранение химической чистоты нанокерамики за счет размещения предварительно спрессованного исходного порошка в защитный экран из танталовой фольги между двумя дисками из молибдена. Чтобы

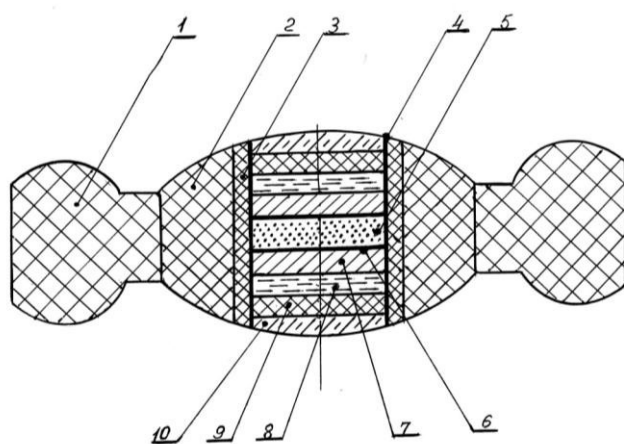


Рис. 1 Схема снаряжение ячейки высокого давления: 1 – кольцо, 2 – втулка, 3 – трубчатый нагреватель, 4 – экран из танталовой фольги, 5 – нанопорошок YAG, 6 – диск молибденовый, 7 – диск твердосплавный (ВК6) 8 – диск из гексагональной нитрида бора, 9 – диск графитовый, 10 – диск пирофиллитовый

избежать вогнутости нанокерамики после спекания, заготовку размещали между двумя дисками из твердого сплава. Для обеспечения квазигидростатичности в рабочем объеме использовали диски из гексагональной нитрида бора, которые располагали над дисками из твердого сплава.

Визуально оценку качества полученных образцов оксидной оптической керамики осуществляли с помощью стереомикроскопа NBHG ZTX-3E с возможностью цифровой фиксации изображений исследуемых объектов с последующей их обработкой с помощью программно-аппаратного комплекса IMAGE ANALYSE (фирма Glory).

Спектры пропускания образцов в диапазоне 350–900 нм регистрировали с помощью спектрометра SHIMATSU UV 260.

Спектры фотolumинесценции долгоживущих состояний исследовались с использованием следующей методики. Возбуждение производилось с помощью импульсного азотного лазера (337 нм) с длительностью импульса 8 нс и частотой повторения 100 Гц. Средняя мощность импульса составляла 20 мВт. Сигнал фотolumинесценции после монохроматора (MS2004, SOLAR ТП) регистрировался фотоумножителем (НАМАМАТСУ С6270) связанным с платой АЦП (частота дискретизации 1 ГГц). Контроль изменения профиля лазерного пучка с образцом с помощью CCD-камеры Ophir Spiricon SP-620U.

Магнитные характеристики образцов керамики, полученных в условиях высокого давления, исследовали методом магнитометрии на вибрационном магнитометре «Vibrating Magnetometer 7404 VSM» (фирма «Lake Shore Cryotronics, Inc.», США) в магнитных полях с напряженностью до 3000 эрстед. Чувствительность магнитометра составляет  $\approx 10^{-7}$  EMU, что позволяет выполнять измерения магнитного момента на образцах массой порядка единиц миллиграмма. Масса исследуемых образцов определялась с помощью электронных микровесов AB135-S/FACT с автокомпенсацией (фирма «METTLER TOLEDO», Швейцария).

#### Результаты исследований и их обсуждение

Электронно-микроскопическими исследованиями исходного нанопоршка АИГ установлено, что он представлен в виде агрегатов размером порядка 1–5 мкм, а также отдельных частиц размером от 30 до 100 нм (рис. 2).

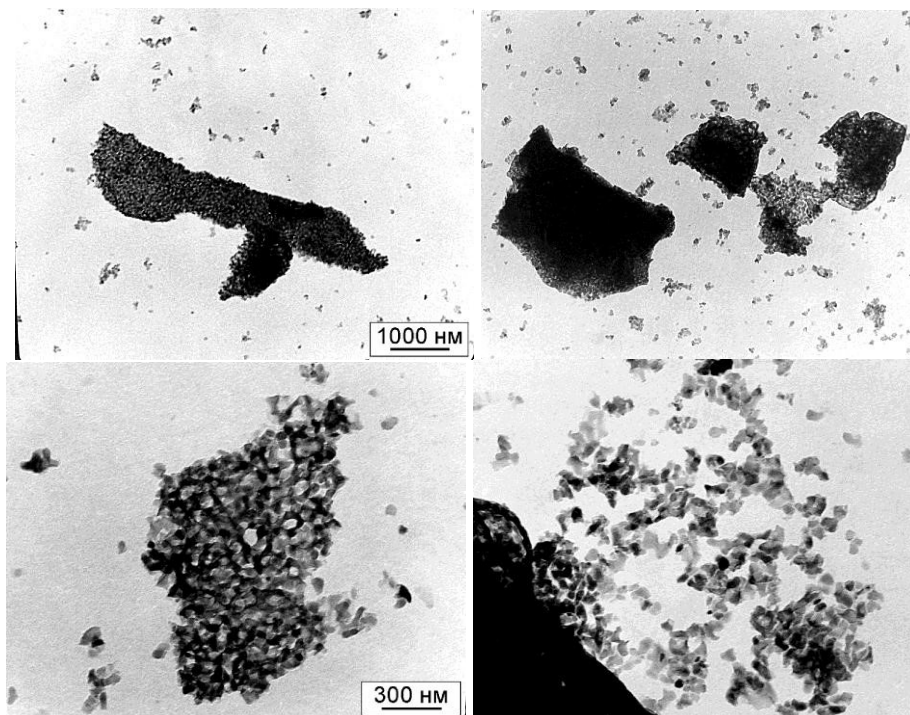


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение порошка  $Y_3Al_5O_{12}$

Агрегаты частиц достаточно жесткие и имеют форму пластин. По-видимому, агрегаты повторяют форму тех первичных частиц, из которых, в результате синтеза были образованы частицы  $Y_3Al_5O_{12}$ . Отдельные частицы  $Y_3Al_5O_{12}$  (распавшиеся агрегаты) представляют собой монокристаллы в виде пластин неправильной формы. На микродифракционной картине наблюдается дифракция в виде колец с неоднородным по интенсивности распределением рефлексов по кольцу. Расчет электронограммы дает хорошее совпадение с табличными данными, соответствующими фазе  $Y_3Al_5O_{12}$  (табл. 1).

Таблица 1. Расчет электронограммы, полученной от нанопорошка  $Y_3Al_5O_{12}$

$D$ , мм	$d_{\text{эксп.}}$ , Å	$d_{\text{теор.}}$ , Å	$hkl$	фаза	$I_n/I_0$
8,5	4,93	4,90	112	$Y_3Al_5O_{12}$	30
13,0	3,22	3,21	321	$Y_3Al_5O_{12}$	17
13,8	3,03	3,00	400	$Y_3Al_5O_{12}$	24
15,5	2,70	2,69	420	$Y_3Al_5O_{12}$	100
17,0	2,46	2,45	224	$Y_3Al_5O_{12}$	20

Нанокерамику спекали при высоком давлении (~ 7,5 ГПа) и температуре (300–500 °С) в течение 2,5 мин. в аппарате типа «тороид». Ниже в табл. 2 приведена характеристика полученных образцов.

Таблица 2. Характеристика нанокерамики из нанопорошка  $YAG$  в зависимости от температуры спекания

Образец	Температура спекания, °С	Характеристика
1	300	полупрозрачный
2	400	прозрачный, несколько хуже образца 3
3	450	прозрачный
4	475	прозрачный, лучший из полученных
5	500	прозрачный

Керамику, полученную при 450 °С, показано на рис. 3. Высокую чистоту спеченных образцов нанокерамики подтверждают исследование их магнитных свойств. На рис. 4 приведена зависимость удельного магнитного момента  $m$  (emu/g) от напряжённости магнитного поля  $H$  (эрстеды) для полученного при 450 °С образца  $Y_3Al_5O_{12}$ .



Рис. 3. Керамика из нанопорошка  $Y_3Al_5O_{12}$ , полученной при 450 °С

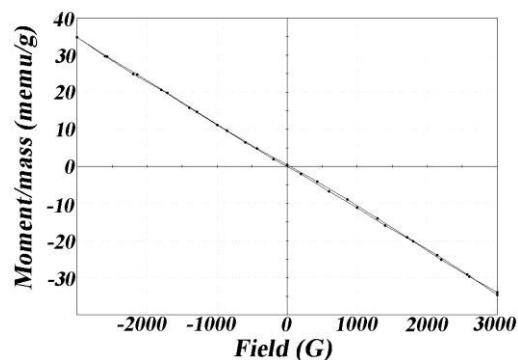


Рис. 4. Зависимость удельного магнитного момента от напряжённости магнитного поля для  $Y_3Al_5O_{12}$  образца, полученного в условиях высокого давления и температуры

Из рис. 4 видно, что зависимость  $m = f(H)$  имеет вид, характерный для диамагнетика, что указывает на достаточно высокую чистоту полученных образцов  $Y_3Al_5O_{12}$ . Удельный магнитный момент при напряжённости магнитного поля  $H = 3000$  эрстед составляет  $m = 0,03466$  *emu/g*. При этом величина удельной магнитной восприимчивости для диамагнитного материала  $Y_3Al_5O_{12}$  равна  $-\chi \approx 1,44 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг.

Нами была предпринята попытка оценить эффективный размер зерен в полученных керамических образцах  $Y_3Al_5O_{12}$ . Одним из возможных способов оценки размера гранул или зерен в тонких образцах является применение теории Рэля-Ганса-Дебая [5], в соответствии с которой, если пренебречь поляризацией света, который регистрируется детектором, то результирующую интенсивность можно записать в виде:

$$I_{total}(\beta) = I_0 \frac{32\pi^4}{9\lambda_m l^2} \left( \frac{\Delta n}{n} \right)^2 (1 + \cos^2 \beta) P_p(u) \quad (1)$$

где  $l$  – расстояние между регистрирующим устройством и образцом,  $\beta$  угол рассеяния,  $\Delta n$  разница между показателями преломления рассеивающего центра и окружающего вещества,  $\lambda_m$  длина волны света в веществе, а  $P_p(u) = \sum r_i^6 P_i(u)$  фактор рассеяния, который для сферического зерна равен [6]:

$$P(u) \equiv \left[ \frac{3}{u^3} (\sin u - u \cos u) \right]^2 \quad (2)$$

$$u \equiv \frac{4\pi r}{\lambda_m} \sin \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

где  $r$  – радиус рассеивающей сферы (зерна).

Как уже выше отмечалось, согласно результатам электронной микроскопии частицы

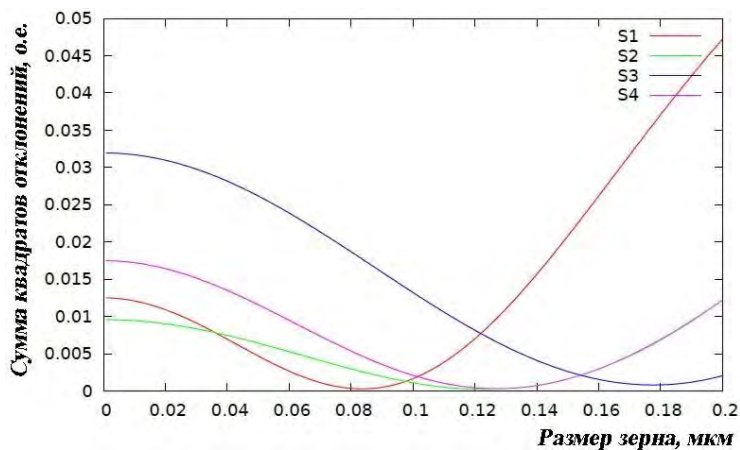


Рис. 5. Значения суммы квадратов отклонений в зависимости от эффективного размера зерна

порошка, из которого были изготовлены образцы, имели размер 30–100 нм до спекания. Эти значения послужили начальным приближением в расчетах. Оценка эффективного размера зерна проходила путем минимизации суммы квадратов отклонений значений функции (1) и экспериментальных данных полученных с использованием непрерывного ДПСС лазера с длиной волны  $\lambda = 532$  нм (рис. 5). Показатель преломления вещества  $n = 1,83805$  [7].

Результаты оценки эффективного размера зерен в

исследуемых образцах представлены в табл. 3, а соответствующая характеристика образцов и их маркировка в табл. 4.

Таблица 3. Результаты оценки эффективного размера зерен в исследуемых образцах

Образец	Температура, °С	Эффективный размер зерна, мкм
S1	400	0.084
S2	450	0.123
S3	475	0.178
S4	500	0.127

Таблица 4. Условная маркировка образцов и параметры их получения

Обозначение	Параметры получения образцов			Толщина образца, мм
	Давление, ГПа	Температура, °С	Продолжительность спекания, мин	
S1	7,5	400	2,5	0,24
S2	7,5	450	2,5	0,26
S3	7,5	475	2,5	0,178
S4	7,5	500	2,5	0,178

Для оптической аттестации образцов (табл. 4) проводили исследование как линейно-оптических так и нелинейно-оптических свойств.

К линейно-оптическим свойствам относят измерение спектров пропускания в видимой области (350–900 нм), спектров фотолюминесценции (350–750 нм), а так же индикатрисы оптического рассеяния при возбуждении непрерывным лазерным излучением (СИ) на длине волны 532 нм. Для изучения нелинейно-оптических свойств проводился контроль трансформации лазерного пучка, прошедшего через образец (СИ  $\lambda = 532$  нм, 1064 нм), и исследования фотоиндуцированных изменений полного и околоосевого пропускания образцов как при непрерывном лазерном возбуждении (532 нм, 1064 нм), так и при импульсном (1064 нм).

В результате проведения исследований установлено, что величина пропускания образцов возрастает от ~ 0.5% до 7% с увеличением длины волны (рис. 6).

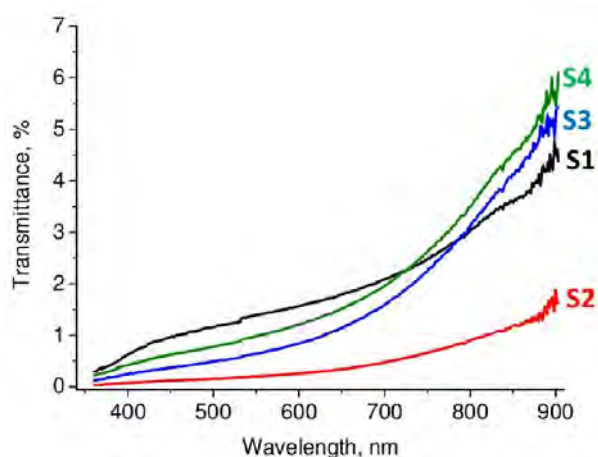


Рис. 6. Спектры пропускания оптической YAG нанокерамики

Полученные значения существенно занижены из-за того, что образцы являются сильно рассеивающими в диапазоне измерений. Зависимости пропускания от длины волны образцов S3 и S4 демонстрируют схожий монотонный рост, который отличается от других образцов. Образец S1 имеет наибольшие значения пропускания в диапазоне 350–700 нм.

Из спектров фотолюминесценции долгоживущих состояний (рис. 7) четко видно, что спектр состоит как минимум из двух пиков разной амплитуды и ширины.

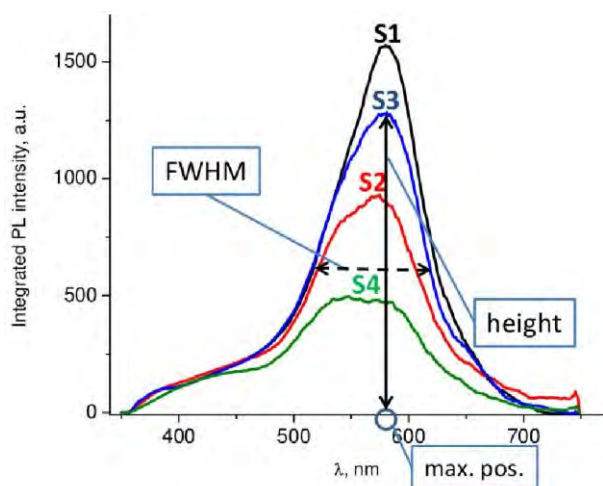


Рис. 7. Спектры фотолюминесценции оптической YAG нанокерамики

Была проведена оценка амплитуды, полуширины (FWHM) и положения по пику с наибольшей интенсивностью. Установлено, что интенсивность основного пика немонотонно изменяется в зависимости от температуры спекания. При росте температуры спекания положение максимума пика смещается в коротковолновую область.

Также был проведен контроль изменения профиля лазерного пучка за образцом с помощью CCD-камеры Ophir Spiricon SP-620U. Возбуждение проводилось с помощью непрерывного лазерного излучения на длинах волн 532 и 1064 нм.

Профили лазерного пучка за образцом, полученные при возбуждении на длинах волн 532 нм и 1064 нм, сильно отличаются друг от друга (рис. 8). Если в видимом диапазоне (532 нм) наблюдается развитая картина рассеяния и полное разрушение лазерного пучка, то в ближнем ИК диапазоне (1064 нм) профиль лазерного пучка практически не изменится.

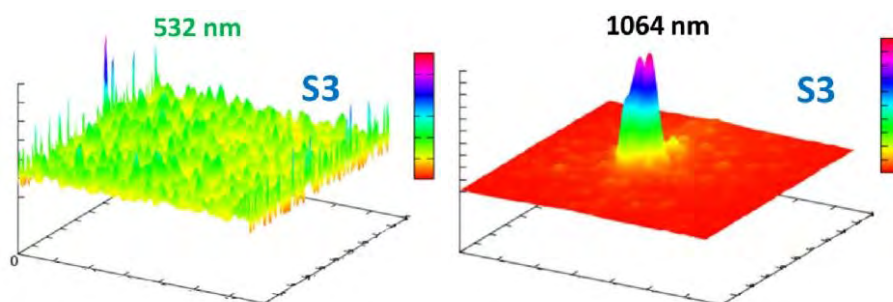


Рис. 8. Профили лазерного пучка за образцом S3, полученные с использованием CCD-камеры

Таким образом, целесообразно проводить исследования эффектов рассеяния в образцах с использованием излучения на длине волны 532 нм, а исследование изменений полного и приосевого пропускания с использованием возбуждения на длине волны 1064 нм.

Результаты изучения пространственного распределения сечения оптического рассеяния представлены на рис. 9.

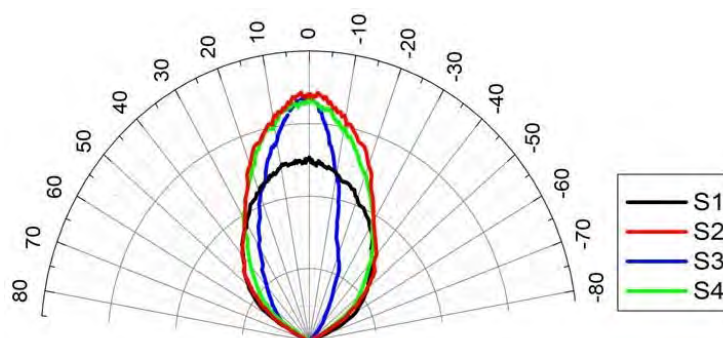


Рис. 9. Сечение оптического рассеяния в переднюю полусферу непрерывном лазерном возбуждении на длине волны 532 нм

Была проведена также оценка потерь на рассеяние на основе расчета интегрального коэффициента рассеяния в переднюю полусферу [8]. Результаты расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5. Полные потери на рассеяние для образцов  $Y_3Al_5O_{12}$

Образец	Температура, °C	Толщина, мм	Потери на расстоянии, %
S1	400	0,24	98,7
S2	450	0,26	97,6
S3	475	0,18	96,4
S4	500	0,18	97,9

Из табл. 5 четко видно, что все образцы являются сильнорассеивающими на длине волны 532 нм. Причем образец S3 обладает наименьшим коэффициентом рассеяния и самой узкой по форме индикатрисой оптического рассеяния по сравнению с остальными образцами. Очевидно, что основной вклад в рассеяние вносит эффект двулучепреломления из-за произвольной ориентации зерен в материале.

Измерение полного пропускания (ПП) проводилось с использованием двух различных источников непрерывного лазерного излучения на длине волны  $\lambda = 532$  нм и 1064 нм [9].

Пространственный профиль интенсивности пучка контролировался с помощью CCD-линейки. Изменение полного пропускания образцов от интенсивности падающего лазерного излучения оценивалось по деформации сфокусированного лазерного пучка, прошедшего через образец. Полученные результаты приведены на рис. 10.

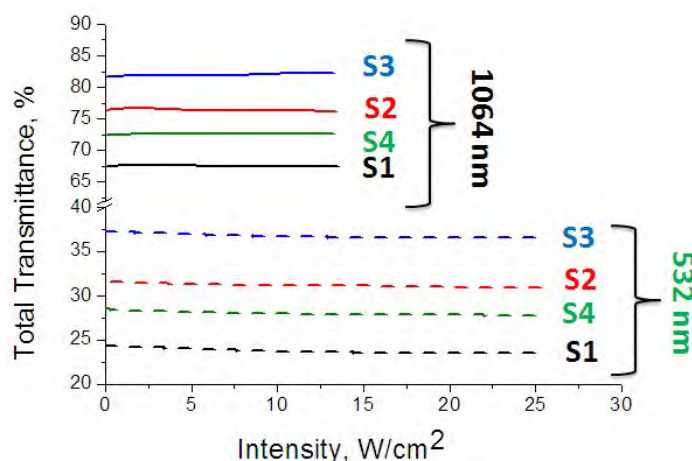


Рис. 10. Зависимость фотоиндуцированного полного пропускания образцов  $Y_3Al_5O_{12}$  от интенсивности непрерывного лазерного излучения на длинах волн 532 и 1064 нм

В табл. 6 приведены значения полного пропускания исследуемых образцов и их сравнение с теоретическими значениями, полученными с учетом двух отражений от поверхности, и литературными данными по пропусканию образцов, изготовленных с применением высоких давлений и температур [1].



Таблица 6. Сравнение полного пропускания (%) образцов в видимом (532 и 650 нм) и ближнем ИК (1064 нм) диапазонах с теоретическими значениями, полученными с учетом двух отражений от поверхности, и литературными данными по пропусканию образцов, изготовленных с применением высоких давлений и температур [1]

Образец	Толщина, мм	Температура спекания, °С	Длина волны, нм		
			532	650	1064
			полное пропускание (%)		
S1	0,24	400	24	39	68
S2	0,26	450	31	38	76
S3	0,18	475	37	47	82
S4	0,18	500	28	40	73
[1]	1,00	350	39	40	40
[1]	1,00	450	38	42	47
YAG(теор.)	–	–	83	83	84

Как видим, значение пропускания образцов на длине волны 1065 нм – 70%, что практически в два раза больше чем пропускания образцов на длине волны 532 нм. Снижение пропускания на длине волны 532 нм может быть связано, как будет показано ниже, с фотоиндуцированным поглощением образцов. Пропускание образца S3 на длине волны 1064 нм равно 82 %, что хорошо согласуется с теоретическими данными.

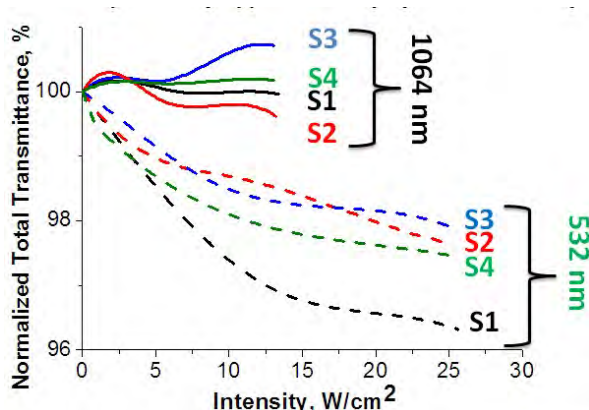


Рис. 11. Зависимость фотоиндуцированного полного пропускания образцов  $Y_3Al_5O_{12}$  от интенсивности непрерывного лазерного излучения на длинах волн 532 и 1064 нм

Фотоиндуцированные изменения пропускания относительно малы. Все зависимости пропускания были нормированы на значения коэффициентов пропускания образцов (линейное пропускание на соответствующей длине волны). Полученные в результате зависимости нормированного фотоиндуцированного пропускания представлены на рис. 11.

Как следует из рис. 11, все исследуемые образцы показывают уменьшение пропускания при возбуждении на длине волны 532 нм (фотоиндуцированное затемнение), тогда как при возбуждении на длине волны 1064 нм в исходном диапазоне энергий происходит увеличение пропускания (фотоиндуцированное просветление).

Для исследования зависимости формы лазерного пучка в зависимости от температуры спекания проводилась регистрация профилей лазерного пучка с использованием CCD-камеры [10]. Возбуждение производилось непрерывным лазерным излучением на длине волны 1064 нм. Полученные распределения интенсивности лазерного излучения, прошедшего через образец, представленные на рис. 12.

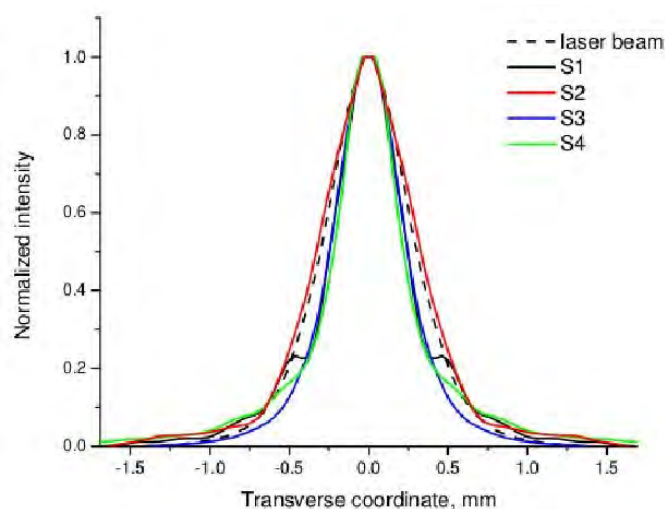


Рис. 12. Распределение интенсивности лазерного пучка в образцах  $Y_3Al_5O_{12}$ , в зависимости от температуры спекания

Оценка радиуса лазерного пучка проводилась с помощью аппроксимации функций Гаусса. Начальный радиус пучка был равен 0,54 мм. Полученные значения радиусов лазерных пучков представлены в табл. 7.

Таблица 7. Ширина профиля лазерного пучка с аппроксимации функцией Гаусса

Образец	Ширина пучка $w$ , мм	$w/w_0$ , у. е.
Начальный лазерный пучок ( $w_0$ )	0,54	1
S1	0,45	0,83
S2	0,57	1,06
S3	0,44	0,81
S4	0,41	0,76

Как видим, все образцы за исключением образца S2 обладают эффектом самофокусировки лазерного пучка, размер пучка после которого остается сравнительно неизменным. Это говорит о том, что исследуемые образцы являются перспективными материалами для применения в нелинейной оптике.

### Выводы

1. Разработана методика получения высокочистой оптической нанокерамики спеканием нанопорошков иттрий-алюминиевого граната (YAG) при высоких давлениях и температуре.

2. На основе теории Рэля-Ганса-Дебая с использованием данных электронной спектроскопии проведена оценка эффективного размера зерен в образцах оптической керамики, полученных при спекании иттрий-алюминиевого граната (YAG). Установлено, что эффективный размер зерна в керамике в зависимости от температуры спекания находится в интервале 84–178 нм, причем минимальный размер зерна имеет керамика, полученная при 400 °С. Кривая температурной зависимости эффективного размера в исследуемом интервале температур имеет максимум (178 нм) при температуре спекания 475 °С. Размер исходных частиц порошка находился в интервале 30–100 нм.

3. Исследованы оптические характеристики YAG-керамики в зависимости от температуры спекания, а именно спектры оптического пропускания, фотолюминесценции,

зависимость полного пропускания образцов от мощности излучения лазера на длинах волн 1064 и 532 нм. Все эксперименты показали существенное изменение оптического отклика при изменении температуры отжига.

4. Установлено, что большинство полученных образцов YAG-керамики обладают эффектом самофокусировки лазерного пучка. Это говорит о том, что исследуемые образцы являются перспективными материалами для применения в нелинейной оптике.

5. Показано, что спеканием нанопорошка YAG, при давлении 7,5 ГПа и температуре 475 °С получен образец керамики, полное пропускание которого в ближнем ИК (1064 нм) диапазоне близко к теоретическому.

Работа выполнена при финансовой поддержке Национальной академии наук Украины (проект № 95/13-Н).

*Вивчено вплив температури спікання при високому тиску на оптичні властивості нанокераміки з  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG). Всі експерименти показали суттєву зміну оптичного відгуку при зміні температури спікання. Встановлено, що більшість отриманих зразків YAG-кераміки мають ефект самофокусування лазерного пучка. Це говорить про те, що досліджувані зразки є перспективними матеріалами для застосування в нелінійній оптиці.*

**Ключові слова:** кераміка, ітрій-алюмінієвий гранат, високий тиск, спікання, оптичні властивості.

*The influence of sintering temperature under high pressure on the optical properties of nanoceramics  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG) was studied. All experiments showed essential change of an optical response at change of temperature of annealing. It is established that the majority of the received samples of YAG-ceramics possess effect of self-focusing of a laser bunch. This indicates that the test samples are promising materials for applications in nonlinear optics.*

**Key words:** ceramic, yttrium-aluminum garnet, high pressure, sintering, the optical properties.

#### Литература

1. Получение прозрачной наноструктурированной керамики  $Y_3Al_5O_{12}$  / Е. А. Вовк, Т. Г. Дейнека, А. Г. Дорошенко и др. // Сверхтвердые матер. – 2009. – № 4. – С. 55–63.
2. Experimental features affecting the transparency of YAG ceramics / L. Esposito, A. Piancastelli, A. L. Costa et al // Optical Materials. – 2011. – 33. – P. 346–354.
3. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Т. 1: Синтез алмаза и подобных материалов / Отв. ред. А. А. Шульженко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля. ИПЦ «АЛКОН», 2003. – 320 с.
4. Почему диоксидциркониевая керамика может быть прозрачной? / Т. Е. Константинова, А. Д. Шевченко, А. А. Шульженко и др. // Тезисы докладов 10-й Международной конференции «Высокие давления–2008, Фундаментальные и прикладные вопросы» 16–20 сентября 2008 г. Судак, Крым. – Донецк, 2008. – С. 122.
5. R. Apetz and M. P. B. van Bruggen Transparent alumina: A light-scattering model // J. of American Ceramics Society. – 2003. – 86 N 3. – P. 480–486.
6. Scattering of Light and Other Electromagnetic radiation. Academic Press, 1969.
7. Handbook of Optics, 3rd edition, Vol. 4. McGraw-Hill 2009.
8. A. Borshch, M. Brodyn, V. Gayvoronsky, P. Maksyutenko, V. Starkov, Ukr. J. Phys. 49. – 2004. – P. 196–202.
9. V. Gayvoronsky et. al., “Techniques to Characterize the Nonlinear Optical Response of Doped Nematic Liquid Crystals”, Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 426, 2005. – P. 231–241.
10. V. Gayvoronsky et. al., “Self-focusing effect on the second harmonic generation in the KDP single crystals with incorporated anatase nanoparticles”, Fun. Mat. 19, No. 1, 2012.

Поступила 19.06.13