

УДК 666.3–492.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ АЛЮМОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКЦИИ¹

© П. В. Карпюк, Д. Е. Кузнецова, К. Б. Богатов, Г. А. Досовицкий²*Статья поступила 16 декабря 2016 г.*

Представлены методология и результаты исследования гранулометрического состава наноструктурированного порошка алюмоиттриевого граната, активированного церием, методом лазерной дифракции, основанным на различии в характере рассеивания лазерного излучения на частицах разного размера. Измерения проводили в токе дисперсионной среды, поэтому из-за агрегации частиц порошка получаемые размеры были завышены. Опробовали различные дисперсионные среды (вода, этанол, изопропанол) и добавки (соли Na и ПАВ) для снижения степени агрегации. По сравнению со стандартной системой вода — измеряемая проба большинство модифицированных тем или иным способом сред показывали снижение агломерации в процессе измерений. Наиболее стабильные результаты получили в случае изопропанола и воды с добавлением фосфатов Na, эффективно препятствующих процессу агрегации. Таким образом установлено, что лучшая среда при определении гранулометрического состава — вода с добавлением ортофосфата Na. В такой среде коллоидная система достаточно стабилизирована, а компоненты просты и общедоступны.

Ключевые слова: алюмоиттриевый гранат; гранулометрический состав; лазерная дифракция; наноструктурированный порошок.

Важный фактор при получении керамических изделий — дисперсность используемых порошков. Размер порошковых частиц и распределение их по размеру играют существенную роль в процессе компактирования (например, методами прессования, шликерного литья и др.), влияя на качество керамики [1, 2]. В связи с этим контроль размеров частиц — неотъемлемый элемент процесса получения керамики.

Керамику на основе алюмоиттриевого граната (yttrium aluminum garnet — YAG) применяют в качестве материала для твердотельных лазеров [3, 4], сцинтиллятора [5, 6], керамического люминофора для светодиодных источников освещения [7, 8]. Большой интерес в качестве люминесцентных материалов вызывают также родственные соединения — сложные оксиды со структурой граната на основе редкоземельных элементов (LuAG [9, 10], TbAG [11], GGAG, GYGAG [12, 13]). Такую керамику получают из наноструктурированных порошков, зачастую представляющих собой первичные частицы размером в десятки нанометров, собранные в агломераты размерами от единиц до десятков микрон. При этом именно размеры последних определяют гранулометрический состав порошка, влияющий на «упаковку» частиц при компактировании.

Гранулометрический состав порошка определяют ситовым [14] и седиментационным анализами, микроскопией [15], акустическими методами и методами, основанными на взаимодействии частиц с различными видами излучений [16 – 19].

Лазерную дифракцию, которая характеризуется экспрессностью, репрезентативностью и возможностью анализа малых проб, как правило, используют при диспергировании пробы в жидкой среде. При этом частицы могут слипаться в агрегаты, что существенно искажает получаемые результаты.

Агрегация частиц порошка происходит за счет двух видов взаимодействий: Ван-дер-Ваальсового между самими частицами и между молекулами дисперсионной среды, находящимися на поверхности частиц. Способы уменьшения степени агрегации в первую очередь направлены на противодействие этим силам притяжения. Так, для разрушения слабосцепленных агрегатов измерение гранулометрического состава методом лазерной дифракции проводят с использованием ультразвука [17, 18].

Степень агрегации частиц зависит от природы дисперсионной среды: одни стабильнее в водной среде, другие — в среде органических растворителей [20 – 22]. Например, для предотвращения агрегации высокодисперсных порошков в водные среды вводят добавки растворимых солей, играющих роль электролитов и за счет зарядки поверхности частиц порошка обеспечивающих электростатическую стабилизацию [23, 24]. При измерении гранулометрического состава

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62515X0033).

² Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия; e-mail: silancedie@mail.ru

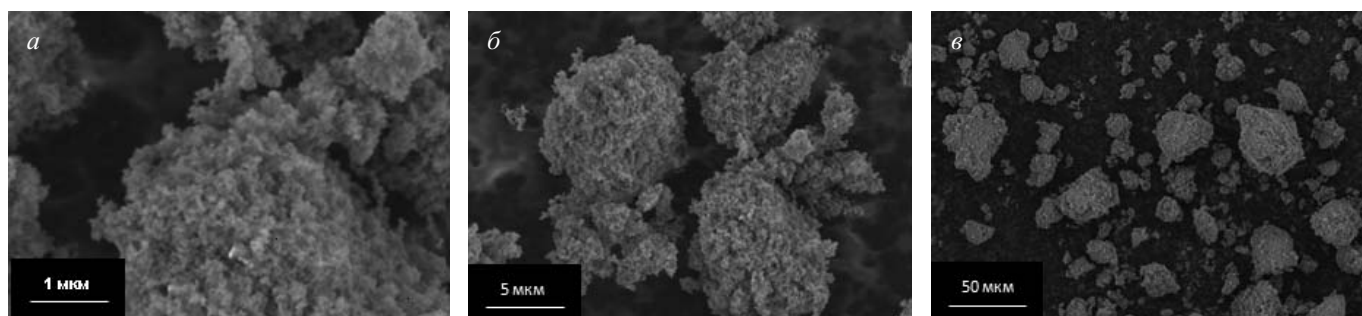


Рис. 1. Изображения агломератов порошка алюмоиттриевого граната, полученные методом сканирующей электронной микроскопии

фосфатных люминофоров методом седиментации в водной среде в качестве добавки используют пирофосфат натрия [25].

Предотвратить коагуляцию частиц можно также добавлением поверхностно активных веществ (ПАВ) [26], сорбирующихся на поверхности и не позволяющих частицам контактировать друг с другом. Для стабилизации частиц алюмоиттриевого граната в водных суспензиях, например, применяют как ионогенные, так и неионогенные ПАВ [27, 28]. Интерес к влиянию ПАВ на результаты измерений гранулометрического состава порошков обусловлен также тем, что различные типы ПАВ используют при приготовлении шликеров для компактирования керамики.

Цель работы — определение гранулометрического состава наноструктурированных порошков алюмоиттриевого граната, активированного церием, методом лазерной дифракции.

Измерения состава проводили на лазерном гранулометре Mastersizer 2000 в жидкой фазе при воздействии ультразвука. Сканирующую электронную микроскопию порошка — на приборе SU 1510.

Распределение частиц по размерам (мкм) характеризуется тремя числами: $d(0,1)$, $d(0,5)$ и $d(0,9)$ [$d(0,5)$ — медианный размер, при котором весовая доля частиц других размеров составляет 50 %; $d(0,1)$ и $d(0,9)$ — размеры, при которых весовая доля частиц меньшего размера составляет 10 и 90 % соответственно]. Доверительные границы случайной погрешности

при измерении d на лазерном гранулометре следующие, %: 3 — для $d(0,5)$ и 5 — для $d(0,1)$ и $d(0,9)$.

В качестве жидкой фазы использовали воду, этиловый и изопропиловый спирты. В роли электролитов — соли натрия: ортофосфат (Na_3PO_4), дигидрофосфат (NaH_2PO_4), хлорид (NaCl) и сульфат (Na_2SO_4) (квалификации не ниже чда). Для обеспечения концентрации электролита в измерительной кювете 0,5 и 1,0 г/л электролиты к объему воды в диспергирующей приставке добавляли в виде 10 %-ных растворов. В качестве добавок ПАВ использовали: Metolat 388 (смесь неионогенных эфиров), Edaplan 490 (неионогенный сополимер) и ВУК 180 (алкиламмониевая соль сополимера) (см. таблицу).

Исследовали активированный церием порошок алюмоиттриевого граната состава $\text{Y}_{2,97}\text{Ce}_{0,03}\text{Al}_5\text{O}_{12}$, полученный методом совместного осаждения из азотнокислых растворов (осадитель — гидрокарбонат аммония) [29]. Порошок состоял из первичных частиц размером около 50 нм, которые формировали агломераты размерами 1 – 50 мкм (рис. 1).

Стабилизация частиц в различных дисперсионных средах напрямую связана с явлением смачиваемости. При хорошей смачиваемости на поверхности частиц образуются сольватные оболочки, которые могут препятствовать коагуляции. На основании этого предположили, что измерения в неводных средах могут дать более стабильные результаты.

На рис. 2 представлен результат растекания на образце YAG-керамики капель воды и этилового спирта.

Дисперсионные среды, использованные при измерениях

Основное вещество	Добавка	Концентрация в измерительной кювете, г/л	Комментарий
Вода	—	—	—
Вода	Na_3PO_4	0,5 – 1	—
Вода	NaH_2PO_4	0,5 – 1	—
Вода	Na_2SO_4	0,5 – 1	—
Вода	NaCl	0,5 – 1	—
Вода	Metolat 388	0,25	Смесь неионогенных полигликолевых эфиров
Вода	Edaplan 490	0,25	Высокомолекулярный неионогенный сополимер
Вода	ВУК 180	0,25	Алкиламмониевая соль сополимера с карбоксильными группами
Этанол	—	—	—
Изопропанол	—	—	—

При определении гранулометрического состава методом лазерной дифракции в водной среде без дополнительных добавок наблюдали существенную агрегацию частиц (рис. 3, *а*). Так, параметр $d(0,9)$, характеризующий наиболее крупные частицы в распределении, возрастал с 48,824 до 64,293 мкм в течение 2 мин, а по прошествии 12 мин достигал 419,800 мкм. Значительно менялся и медианный размер $d(0,5)$: от 11,211 до 62,889 мкм.

При использовании в качестве дисперсионной среды этилового спирта доля частиц больше 100 мкм заметно росла, что свидетельствовало о значительной агрегации частиц (рис. 3, *б*). Параметр $d(0,9)$ менялся от 56,321 до 227,043, медианный размер $d(0,5)$ — от 12,754 до 13,274 мкм.

В случае изопропилового спирта (рис. 3, *в*) степень агрегации с течением времени была более низкой — $d(0,9)$ менялся от 50,443 после 2 мин измерений до 59,855 мкм после 12 мин. Медианный размер $d(0,5)$ в свою очередь уменьшался от 10,226 до 7,909 мкм, что может быть связано с действием ультразвука в диспергирующей приставке.

Различное поведение порошка в спиртовых средах можно объяснить большим размером и более разветвленной структурой молекул изопропилового спирта, которые за счет стерического фактора эффек-

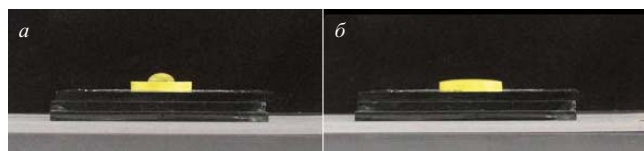


Рис. 2. Растекание на образце YAG-керамики капель воды (*а*) и этилового спирта (*б*)

тивнее (по сравнению с этиловым спиртом) препятствуют слипанию частиц, а также возможным влиянием остаточной воды в этаноле, наиболее распространенная форма которого — 96 %-ный азеотропный раствор.

Влияние электролитов на слипание частиц было сходным. На рис. 4 приведены результаты измерений дисперсного состава порошка в воде при добавлении 1 г/л четырех различных электролитов.

Видно, что распределения частиц по размерам, полученные сразу после внесения образца в измерительную камеру, совпадают (за исключением незначительной доли крупных частиц при измерении с добавкой NaH_2PO_4) (см. рис. 4, *а*). Значения $d(0,5)$ составили, мкм: Na_3PO_4 — 10,504, NaH_2PO_4 — 11,039, NaCl — 10,504, Na_2SO_4 — 10,144 (разница находится в пределах случайной погрешности прибора). Нали-

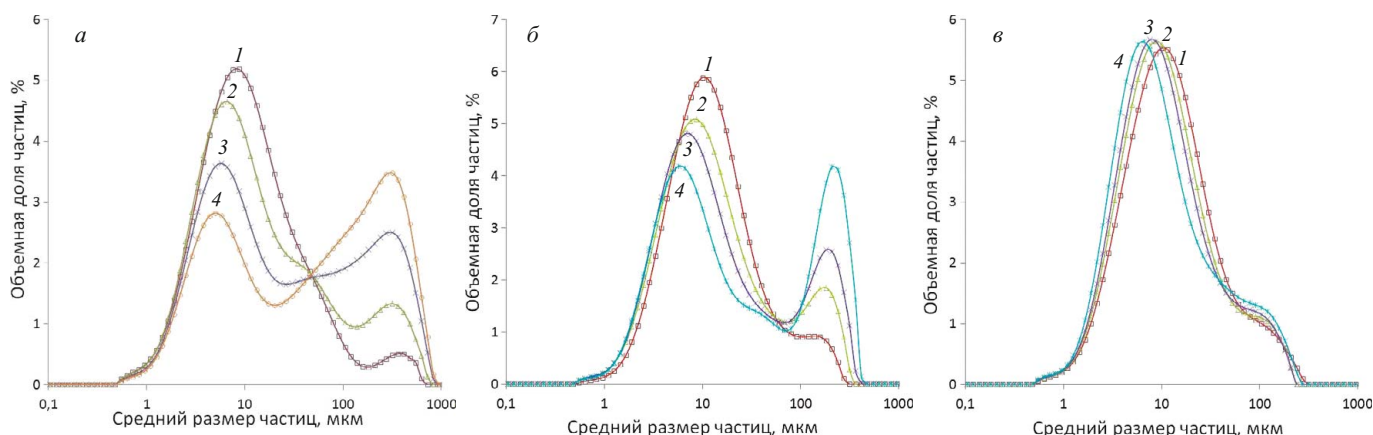
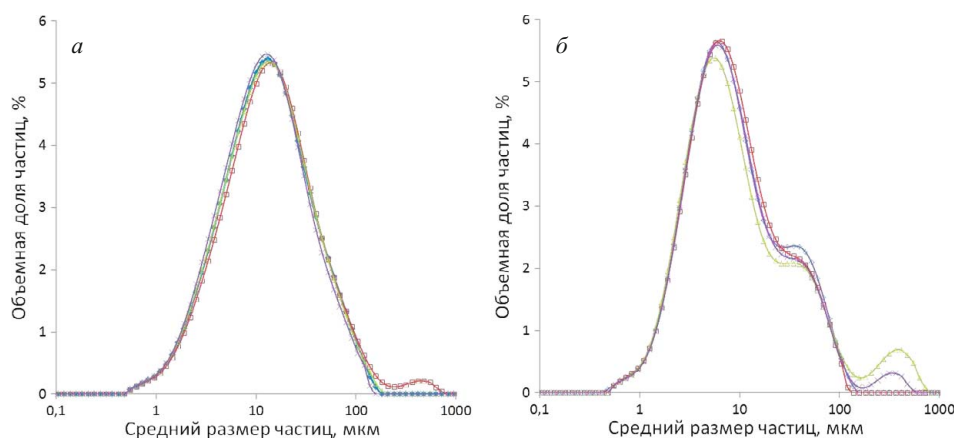


Рис. 3. Распределение частиц по размерам при измерении в воде без дополнительных добавок (*а*), этиловом (*б*) и изопропиловом (*в*) спиртах через 2 (*1*), 4 (*2*), 6 (*3*) и 12 мин (*4*) после внесения пробы в измерительную кювету

Рис. 4. Распределение частиц по размерам при измерении с добавлением Na_3PO_4 ($\diamond$), NaH_2PO_4 ($\square$), NaCl ($\triangle$) и Na_2SO_4 ($\times$) в момент внесения (*а*) и через 4 мин после внесения образца в диспергирующую приставку (*б*)



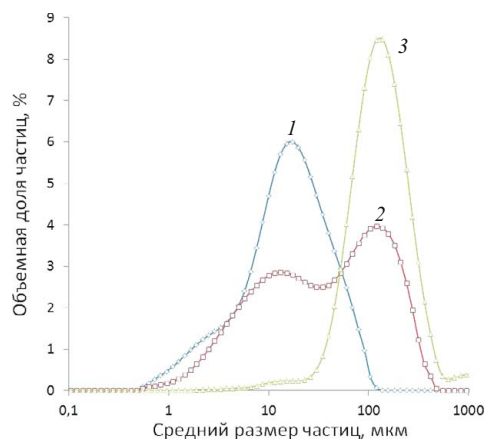


Рис. 5. Распределение частиц по размерам при измерении с добавлением ПАВ в момент внесения образца в диспергирующую приставку: 1 — Metolat 388; 2 — Edaplan 490; 3 — БУК 180

чие максимума в области крупных (доли миллиметра) частиц (NaH_2PO_4) возможно связано с тем, что в момент внесения образцов в анализатор процессы сорбции ионов электролита и образования двойного электрического слоя не успели пройти в достаточной мере, чтобы стабилизировать частицы за счет электростатического эффекта. Через 4 мин после внесения пробы распределения также совпадают, однако в случаях NaCl и Na_2SO_4 появляется доля частиц с размерами более 100 мкм (рис. 4, б).

Отсутствие значительных различий в распределениях можно объяснить общей схожестью электролитов и их близостью в степени диссоциации (сильные электролиты, хорошо растворимы в воде). Также стоит отметить, что в водной среде ионы металлов, находящиеся на поверхности оксидных частиц, могут гидратироваться и переходить в раствор, в результате чего поверхность частиц оксида приобретает отрицательный заряд и может адсорбировать положительно заряженные ионы [30 – 32]. Таким образом, потенциал поверхности частиц определяют ионы кислорода, а противоионами, формирующими диффузионную часть двойного электрического слоя, оказываются катионы металлов. Известно, что избыток электролита в системе может привести к перезарядке двойного электрического слоя и агрегации частиц [33]. Наши исследования показали, что увеличение добавляемого количества электролита в два раза не приводит к изменению результатов измерений.

Распределения частиц для случая использования ПАВ представлены на рис. 5. Концентрация ПАВ в измерительной кювете — 0,25 г/л.

Видно, что наименьшая агрегация наблюдается в случае Metolat 388. Для БУК 180 характерен ярко выраженный максимум, находящийся в области крупных частиц. Добавление Edaplan 490 приводит к заметной агрегации частиц, при этом распределение имеет два максимума (в системе присутствуют частицы как до 100 мкм, так и большего размера).

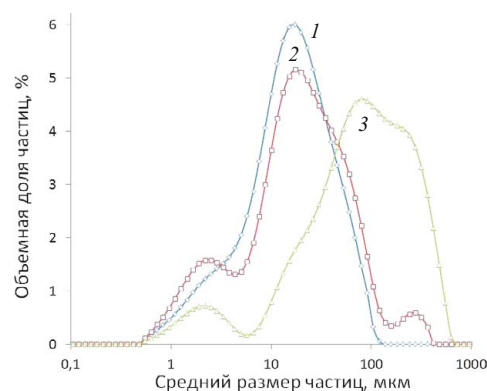


Рис. 6. Распределение частиц по размерам при измерении с добавлением Metolat 388 в момент внесения (1) и через 2 (2) и 4 мин (3)

Несмотря на то что при внесении образца в диспергирующую приставку Metolat 388 препятствует агрегации так же эффективно, как и добавление электролитов, действие ПАВ оказывается нестабильным, и с течением времени происходит значительная агрегация частиц (рис. 6).

Таким образом, исследуемые ПАВ не позволяют в достаточной мере надежно препятствовать коагуляции частиц. К тому же вследствие своей химической природы они труднее вымываются из измерительной системы прибора по сравнению с водорастворимыми электролитами или спиртами, поэтому использование ПАВ при определении состава целесообразно только в случае неэффективности более простых средств.

Лазерная дифракция может применяться для получения информации о возможном поведении частиц при изменении характеристик дисперсионной среды и в более концентрированных суспензиях (например, шликерах на водной основе). В концентрированном виде, как правило, можно измерить лишь такие параметры суспензий, как pH, вязкость, скорость расслоения. С помощью же лазерной дифракции можно наблюдать непосредственно агрегацию частиц в зависимости от состава дисперсионной среды.

Проведенные исследования показали, что наилучшее сочетание эффективности и удобства продемонстрировал подход, основанный на использовании электролита. Наиболее стабильные результаты измерений получены с применением в качестве добавки ортофосфата натрия Na_3PO_4 . Кроме того, поведение частиц при измерении существенно зависит от дисперсионной среды, что позволяет использовать метод лазерной дифракции в качестве одного из инструментов при подборе составов суспензий.

Авторы благодарят Центр коллективного пользования ФГУП «ИРЕА» за возможность использования оборудования ЦКП при выполнении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакунов В. С., Беляков А. В. Технология керамики как процесс аккумуляции и диссипации энергии / Конструкции из композиционных материалов. 2005. № 2. С. 5 – 18.
2. Merac M. R., Kleebe H. J., Müller M. M., Reimanis I. E. Fifty Years of Research and Development Coming to Fruition; Unraveling the Complex Interactions during Processing of Transparent Magnesium Aluminate (MgAl_2O_4) Spinel / J. Am. Ceram. Soc. 2013. N 96(11). P. 3341 – 3365.
3. Ikesue A., Aung Y. Ceramic laser materials / Nat. Photonics. 2008. N 2. P. 721 – 727.
4. Lupei V., Lupei A. Nd:YAG at its 50th anniversary: Still to learn / J. Luminesc. 2016. Vol. 169. Part B. P. 426 – 439.
5. Zych E., Brecher C., Wojtowicz A., Lingertat H. Luminescence properties of Ce-activated YAG optical ceramic scintillator materials / J. Luminesc. 1997. N 75. P. 193 – 203.
6. Mihokova E., Nikl M., Mares J., Beitlerova A., Vedda A., Nejezchleb K., Blazek K., D'Ambrosio C. Luminescence and scintillation properties of YAG: Ce single crystal and optical ceramics / J. Luminesc. 2007. N 126. P. 77 – 80.
7. Nishiura S., Tanabe S., Fujioka K., Fujimoto Y. Properties of transparent Ce: YAG ceramic phosphors for white LED / Optical Mater. 2011. N 33. P. 688 – 691.
8. Raukas M., Kelso J., Zheng Y., Bergenek K., Eisert D., Linkov A., Jermann F. Ceramic Phosphors for Light Conversion in LEDs / ECS J. Solid State Sci. Technol. 2013. Vol. 2. Issue 2. P. R3168 – R3176.
9. Kuntz J., Roberts J., Hough M., Cherepy N. Multiple synthesis routes to transparent ceramic lutetium aluminum garnet / Scripta Mater. 2007. N 57(10). P. 960 – 963.
10. Nikl M., Mares J., Solovieva N., Li H., Liu X., Huang L., D'Ambrosio C. Scintillation characteristics of $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: Ce optical ceramics / J. Appl. Phys. 2007. N 101(3). P. 033515-1 – 033515-5.
11. Chen C., Zhou S., Lin H., Yi Q. Fabrication and performance optimization of the magneto-optical $(\text{Tb}_{1-x}\text{R}_x)_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($\text{R} = \text{Y}, \text{Ce}$) transparent ceramics / Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. N 13. P. 131908-1 – 131908-4.
12. Seeley Z. M., Cherepy N. J., Payne S. A. Homogeneity of Gd-based garnet transparent ceramic scintillators for gamma spectroscopy / J. Crystal Growth. 2013. N 379. P. 79 – 83.
13. Seeley Z. M., Cherepy N. J., Payne S. A. Expanded phase stability of Gd-based garnet transparent ceramic scintillators / J. Mater. Res. 2014. N 29(19). P. 2332 – 2337.
14. Воробьева В. Н., Астафьев Г. В. Методы исследования нефтей и нефтепродуктов, присадок, катализаторов, адсорбентов. — М.: Химия, 1967. — 430 с.
15. Романков П. Г., Курочкина М. И. Экстрагирование из твердых материалов. — М.: Химия, 1983. — 256 с.
16. Домкин К. И., Трусков В. А., Недорезов В. Г. Оптические методы определения размеров мелкодисперсных материалов / Международный симпозиум «Надежность и качество»: сб. тр. Т. 2. — Пенза, 2011. С. 154 – 158.
17. Тимошук Е. И., Самойлов В. М., Тимошук Е. В., Смирнов В. К. Применение лазерной дифракции для определения размеров частиц наполнителей и пресс-порошков в производстве тонкозернистых графитов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 5. С. 26 – 29.
18. Пименова Н. В., Пермин Д. А. Исследование гранулометрического состава ультраотонких порошков Y_2O_3 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 5. С. 41 – 46.
19. Эстемирова С. Х., Печищева Н. В., Кожина Г. А. Определение размера частиц ультрадисперсных порошков твердых растворов манганитов $(\text{Nd}, \text{Gd})_x\text{Ca}_{1-x}\text{MnO}_3$ методом фотонной корреляционной спектроскопии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 12. С. 26 – 31.
20. Сокольский Г. В., Макаренков Д. А., Рыжов А. В., Лобастов С. Л. Исследование процесса диспергирования многокомпонентных пигментных паст в водной среде / Химическая промышленность сегодня. 2013. № 12. С. 38 – 43.
21. Sigmund W., Bell N., Bergstro L. Novel Powder-Processing Methods for Advanced Ceramics / J. Am. Ceram. Soc. 2000. N 83(7). P. 1557 – 1574.
22. Lewis J. A. Colloidal Processing of Ceramics / J. Am. Ceram. Soc. 2000. N 83(10). P. 2341 – 2359.
23. Shqau K., Akbar S., Verweij H., Dutta P. Electrosteric dispersants used in colloidal processing of ceramics / Ohio State University. CISM. Literature Review. 2005. P. 1 – 17.
24. Liang Y., Hilal N., Langston P., Starov V. Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment / Adv. Colloid Interface Sci. 2007. Vol. 134 – 135. N 31. P. 151 – 166.
25. ГОСТ 25659–83. Люминофор для люминесцентных ламп белой цветности. — М.: Министерство химической промышленности, 1983. — 15 с.
26. Тимошук Е. И., Самойлов В. М., Ляпунов А. Я., Балаклиенко Ю. М., Борунова А. Б. Определение размеров частиц тонкодисперсных порошков искусственного графита методом лазерной дифракции / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 11. С. 25 – 28.
27. Lv Y., Liu H., Sang Y., Liu S., Chen T., Qin H., Wang J. Electrokinetic properties of Nd:YAG nanopowder and a high concentration slurry with ammonium poly (acrylic acid) as dispersant / J. Mater. Sci. 2010. Vol. 45. N 3. P. 706 – 712.
28. Горелова А. В., Коломиченко Н. С., Маньшина А. А., Михайлов М. Д., Семенча А. В. Стабилизация наночастиц алюмоитриевого граната в коллоидных растворах / Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9294> (29.05.17).
29. Досовицкий Г. А., Кузнецова Д. Е., Волков П. А., Напольский К. С., Росляков И. В., Великодный Ю. А., Мудрецова С. Н., Богатов К. Б., Михлин А. Л., Досовицкий А. Е. Наноструктурированный порошок $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$:Ce, полученный соосаждением / Наукоемкие технологии. 2013. Т. 14. № 3. С. 48 – 52.
30. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии Поверхностные явления и дисперсные системы. — М.: Химия, 1989. — 464 с.
31. Васильев В. А., Каралин Э. А., Абрамов А. Г. Адсорбция катиона натрия на поверхности алюмооксидных катализаторов дегидратации 1-фенилэтанола / Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 13. С. 73 – 76.
32. Huo D., Zheng Y., Sun X., Li X., Liu S. Preparation of transparent Y_2O_3 ceramic by slip casting and vacuum sintering / J. Rare Earths. 2012. Vol. 30. N 1. P. 57 – 62.
33. Марченко Р. Т. Физическая и коллоидная химия. — М.: Высшая школа, 1965. — 374 с.

UDC 666.3–492.2

DETERMINATION OF THE YAG POWDER PARTICLE SIZE DISTRIBUTION BY LASER DIFFRACTION METHOD

© P. V. Karpyuk, D. E. Kuznetsova, K. B. Bogatov, and G. A. Dosovitskii

Submitted December 16, 2016.

We present a methodology of studying particle size distribution of Ce-doped YAG (yttrium aluminum garnet) powders by laser diffraction method based on the difference in the character of laser beam scatter-

ing by the particles of different size. Since the measurements are taken in a flow of dispersion medium, powder aggregation probably occurred during measurement procedure can result in overvaluation of the particle size in the distribution thus obtained. Different dispersion media (water, ethanol, isopropanol) and additives (Na salts and commercial surfactants) are used to lower powder aggregation. Most of the modified systems demonstrate reduced agglomeration of the particles during measurement procedure compared to standard “water – powder” dispersion system. The best and most stable results are obtained in isopropanol or water added with phosphate-based electrolyte which effectively prevent aggregation. Addition of surfactants appeared ineffective with regard to the stability of the results. Water with addition of sodium orthophosphate is proposed as the most convenient medium, in which dispersion is stable and all the components are readily available.

Keywords: yttrium aluminum garnet (YAG); particle size distribution; laser diffraction; nanostructured powder.

REFERENCES

1. Bakunov V. S., Belyakov A. V. Ceramic technology as a process of accumulation and dissipation of energy / *Konstr. Kompozits. Mater.* 2005. N 2. P. 5 – 18 [in Russian].
2. Merac M. R., Kleebe H. J., Müller M. M., Reimanis I. E. Fifty Years of Research and Development Coming to Fruition; Unraveling the Complex Interactions during Processing of Transparent Magnesium Aluminate (MgAl_2O_4) Spinel / *J. Am. Ceram. Soc.* 2013. N 96(11). P. 3341 – 3365.
3. Ikesue A., Aung Y. Ceramic laser materials / *Nat. Photonics.* 2008. N 2. P. 721 – 727.
4. Lupei V., Lupei A. Nd:YAG at its 50th anniversary: Still to learn / *J. Luminesc.* 2016. Vol. 169. Part B. P. 426 – 439.
5. Zych E., Brecher C., Wojtowicz A., Lingertat H. Luminescence properties of Ce-activated YAG optical ceramic scintillator materials / *J. Luminesc.* 1997. N 75. P. 193 – 203.
6. Mihokova E., Nikl M., Mares J., Beitlerova A., Vedda A., Nejezchleb K., Blazek K., D'Ambrosio C. Luminescence and scintillation properties of YAG: Ce single crystal and optical ceramics / *J. Luminesc.* 2007. N 126. P. 77 – 80.
7. Nishiura S., Tanabe S., Fujioka K., Fujimoto Y. Properties of transparent Ce: YAG ceramic phosphors for white LED / *Optical Mater.* 2011. N 33. P. 688 – 691.
8. Raukas M., Kelso J., Zheng Y., Bergenek K., Eisert D., Linkov A., Jermann F. Ceramic Phosphors for Light Conversion in LEDs / *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2013. Vol. 2. Issue 2. P. R3168 – R3176.
9. Kuntz J., Roberts J., Hough M., Cherepy N. Multiple synthesis routes to transparent ceramic lutetium aluminum garnet / *Scripta Mater.* 2007. N 57(10). P. 960 – 963.
10. Nikl M., Mares J., Solovieva N., Li H., Liu X., Huang L., D'Ambrosio C. Scintillation characteristics of $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: Ce optical ceramics / *J. Appl. Phys.* 2007. N 101(3). P. 033515-1 – 033515-5.
11. Chen C., Zhou S., Lin H., Yi Q. Fabrication and performance optimization of the magneto-optical $(\text{Tb}_{1-x}\text{R}_x)_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($\text{R} = \text{Y}, \text{Ce}$) transparent ceramics / *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. N 13. P. 131908-1 – 131908-4.
12. Seeley Z. M., Cherepy N. J., Payne S. A. Homogeneity of Gd-based garnet transparent ceramic scintillators for gamma spectroscopy / *J. Crystal Growth.* 2013. N 379. P. 79 – 83.
13. Seeley Z. M., Cherepy N. J., Payne S. A. Expanded phase stability of Gd-based garnet transparent ceramic scintillators / *J. Mater. Res.* 2014. N 29(19). P. 2332 – 2337.
14. Vorob'eva V. N., Astaf'ev G. V. Methods of research of petroleum, petroleum products, additives, catalysts and adsorbents. — Moscow: Khimiya, 1967. — 430 p. [in Russian].
15. Romankov P. G., Kurochkina M. I. Extraction from solid materials. — Moscow: Khimiya, 1983. — 256 p. [in Russian].
16. Domkin K. I., Trusov V. A., Nedorezov V. G. Optical methods of particle size determination of high-dispersed materials / *Proc. Int. Symp. «Reliability and quality»*. Vol. 2. — Penza, 2011. P. 154 – 158 [in Russian].
17. Timoshchuk E. I., Samoilov V. M., Timoshchuk E. V., Smirnov V. K. Application of laser diffraction to determination of the particle size in fillers and Molding powders in fine-grained graphite production / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2010. Vol. 76. N 5. P. 26 – 29 [in Russian].
18. Pimenova N. V., Permin D. A. Study of the grain size distribution in ultra-fine Y_2O_3 powders / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 5. P. 41 – 46 [in Russian].
19. Éstemirowa S. Kh., Pechishcheva N. V., Kozhina G. A. Determination the particle size of ultra-fine powders of manganite solid solutions (Nd, Gd) $_x\text{Ca}_{1-x}\text{MnO}_3$ by photon correlation spectroscopy / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2015. Vol. 81. N 12. P. 26 – 31 [in Russian].
20. Sokol'skii G. V., Makarenkov D. A., Ryzhov A. V., Lobastov S. L. Research of the dispersion process of multicomponent pigment pastes in aqueous medium / *Khim. Promysl. Segodnya.* 2013. N 12. P. 38 – 43 [in Russian].
21. Sigmund W., Bell N., Bergstro L. Novel Powder-Processing Methods for Advanced Ceramics / *J. Am. Ceram. Soc.* 2000. N 83(7). P. 1557 – 1574.
22. Lewis J. A. Colloidal Processing of Ceramics / *J. Am. Ceram. Soc.* 2000. N 83(10). P. 2341 – 2359.
23. Shqau K., Akbar S., Verweij H., Dutta P. Electrosteric dispersants used in colloidal processing of ceramics / Ohio State University. CISM. Literature Review. 2005. P. 1 – 17.
24. Liang Y., Hilal N., Langston P., Starov V. Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment / *Adv. Colloid Interface Sci.* 2007. Vol. 134 – 135. N 31. P. 151 – 166.
25. State Standard GOST 25659–83. Phosphor for fluorescent lamp of white chromaticity. — Moscow: Izd. Ministerstvo khimicheskoi promyshlennosti, 1983. — 15 p. [in Russian].
26. Timoshchuk E. I., Samoilov V. M., Lyapunov A. Ya., Balaklienko Yu. M., Borunova A. B. Determination of the particle size of the powders of the artificial graphite by laser diffraction / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2012. Vol. 78. N 11. P. 25 – 28 [in Russian].
27. Lv Y., Liu H., Sang Y., Liu S., Chen T., Qin H., Wang J. Electrokinetic properties of Nd:YAG nanopowder and a high concentration slurry with ammonium poly (acrylic acid) as dispersant / *J. Mater. Sci.* 2010. Vol. 45. N 3. P. 706 – 712.
28. Gorelova A. V., Kolomichenko N. S., Man'shina A. A., Mikhailov M. D., Semench A. V. Stabilization of nanoparticles in colloid systems / *Sovr. Probl. Nauki Obrazov.* 2013. N 3. [on-line]. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9294> (accessed 29.05.17) [in Russian].
29. Dosovitskii G. A., Kuznetsova D. E., Volkov P. A., Napol'skii K. S., Roslyakov I. V., Velikodnyi Yu. A., Mudretsova S. N., Bogatov K. B., Mikhlin A. L., Dosovitskii A. E. Nanostructured powder of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: Ce manufactured by co-presipitation / *Naukoem. Tekhnol.* 2013. Vol. 14. N 3. P. 48 – 52 [in Russian].
30. Frolov Yu. G. Course of colloid chemistry Surface phenomena and dispersive systems. — Moscow: Khimiya, 1989. — 464 p. [in Russian].
31. Vasil'ev V. A., Karalin É. A., Abramov A. G. Na-ion assorption on the surface of alumino-oxide catalyst of 1-phenylethanol dehydration / *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2011. N 13. P. 73 – 76 [in Russian].
32. Huo D., Zheng Y., Sun X., Li X., Liu S. Preparation of transparent Y_2O_3 ceramic by slip casting and vacuum sintering / *J. Rare Earths.* 2012. Vol. 30. N 1. P. 57 – 62.
33. Marchenko R. T. Physical and Colloid chemistry. — Moscow: Vysshaya shkola, 1965. — 374 p. [in Russian].