

УДК 544.032

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ЭКРАН НА ОСНОВЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. В. Д. Володин¹, В. О. Веселова² *, А. В. Егорышева²

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
Российской академии наук, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова
Российской академии наук, Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: ibvarvara@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 23.06.2023 г.

Впервые создан тонкослойный детектор альфа-частиц на основе $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$. Имобилизация сцинтиллятора на подложке из плавленного кварца осуществлялась при помощи импульсного лазерного облучения слоя порошка ВГО с частицами субмикронного размера. Показано влияние режима лазерной обработки на морфологию и кинетические характеристики сцинтиллятора. Полученный материал обеспечивает большую стойкость детектора к воздействию влаги и воздуха по сравнению с коммерческими аналогами при сравнимой или более высокой эффективности детектирования и может быть использован в задачах экологического мониторинга, в т.ч. для измерения объемной альфа-активности.

Ключевые слова: сцинтилляция, альфа-частицы, радиометрия, импульсное лазерное облучение, кинетика люминесценции

DOI: 10.31857/S0002337X23090166, EDN: HACZMG

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционные детекторы ионизирующего излучения используются для контроля загрязнения радиоактивными нуклидами в процессе переработки ядерного топлива, при разведке новых энергетических ресурсов, в компьютерной томографии и медицинской диагностике. Одной из важных задач, решаемых с помощью сцинтилляционных детекторов альфа-частиц, является регистрация распада радона [1]. Радиационное воздействие радона и его дочерних продуктов распада на легкие атомы представляет существенный вклад в годовую дозу облучения населения и в некоторых регионах является причиной значительного количества онкологических заболеваний [2]. В связи с этим крайне актуальной задачей является разработка радиометров для измерения объемной альфа-активности радона в воздухе жилых и рабочих помещений, в источниках питьевой воды, при планировании строительства и т.д. [3–5].

Применяющиеся в большинстве современных коммерчески доступных разработок полупроводниковые поверхностно-барьерные детекторы для прямой регистрации альфа-частиц характеризуются высокой ценой при сравнительно малой площади чувствительной поверхности, что при-

водит к большой длительности измерений фоновых уровней радона (на одно измерение уходят часы) и малой доступности радиометров радона для населения. Детекторы альфа-излучения на основе сцинтилляционных экранов выгодно отличаются низкой ценой и возможностью неограниченного наращивания площади чувствительной поверхности, т.е. возможностью нанесения сцинтиллирующего вещества на подложки больших размеров. Прогресс в области твердотельных приемников света и появление коммерчески доступных твердотельных лавинных детекторов света (кремниевые фотоумножители, SiPM), не уступающих в чувствительности вакуумным ФЭУ и не требующих высокостабильного высоковольтного питания, позволяет конструировать на их основе малогабаритные сцинтилляционные детекторы радона с высокой чувствительностью. Об актуальности и интересе исследователей к этой задаче свидетельствует значительное число публикаций и обзоров, посвященных проблеме детектирования радона и создания новых материалов для этой цели [6–8].

Традиционно материалом для сцинтилляционных детекторов альфа-излучения служат полупроводниковые люминофоры типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ – сульфиды или селениды цинка и кадмия, а также их

твердые растворы, допированные медью, марганцем и другими активаторами. Такие сцинтилляторы обладают высокой эффективностью, но не лишены серьезных недостатков. Одним из главных является деградация характеристик вследствие окисления халькогенидов цинка и кадмия кислородом воздуха, от которого их невозможно изолировать. Из других недостатков стоит отметить заметное самопоглощение света люминесценции, длительное (секунды) послесвечение и высокую токсичность соединений кадмия и селена. Оксидные сцинтилляторы лишены этих недостатков, а их низкий по сравнению с халькогенидами световыход не вызывает проблем при применении, т.к. энергия альфа-частиц достаточно велика. Одним из перспективных оксидных материалов является ортогерманат висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO), также хорошо известный как эффективный сцинтиллятор γ -излучения [9]. Короткое время высвечивания BGO в значительной степени компенсирует его невысокий световыход, снижая количество темновых импульсов за счет увеличения времени сбора импульсов сцинтилляции, к которым в случае сульфидных сцинтилляторов добавляется засветка из-за послесвечения от предшествующих сцинтилляций. Степень светосбора в больших сцинтилляционных камерах при использовании ортогерманата висмута также выше, чем в случае сульфидных сцинтилляторов из-за его значительно большей отражательной способности по сравнению со слоем сульфида цинка-кадмия. Следует также добавить высокую химическую стойкость BGO и отсутствие собственной радиоактивности. Все это делает ортогерманат висмута перспективным сцинтиллятором для регистрации альфа-излучения [10].

Широкое использование в качестве материала детекторов как α -, так и γ -ионизирующего излучения ортогерманат висмута получил именно в виде монокристаллов. Например, монокристаллы BGO успешно используют в сцинтилляционных болометрах [11, 12]. Они имеют превосходное энергетическое разрешение и высокую эффективность, в то время как одновременное считывание теплового и светового сигналов позволяет идентифицировать взаимодействующие частицы (n , α , β , γ) благодаря их различной светоотдаче.

Альфа-частицы характеризуются коротким пробегом в веществе, что исключает необходимость больших объемов сцинтиллятора и снимает условие его оптической прозрачности. Это открывает возможность для применения порошкообразных сцинтилляторов. В этом случае источником регистрируемого света является поверхность слоя порошка, т.к. пробег альфа-частиц в плотном веществе не превышает десятых долей микрона. Так, например, использование порошкообразных сцинтилляторов для обнаружения альфа-излучающих радионуклидов в водных образцах с

помощью проточных ячеек было признано более эффективным [13] по сравнению с монокристаллическими [14].

Использование порошкообразного BGO может существенно удешевить материал и сделать его более технологичным [15]. Кроме того, это позволяет создавать рабочие окна детекторов любых размеров, нанося сцинтилляционный порошок на прозрачную основу: такие детекторы называются сцинтилляционными экранами и были впервые предложены в [16]. Подобные работы уже проводились на примере сцинтилляционных порошков $\text{Gd}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ [17, 18], ${}^6\text{Li}_2\text{CaSiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ [19], $\text{GYAGG}/{}^6\text{LiF}$ [20] и др. Для закрепления порошка на прозрачной основе, как правило, используют воск или эпоксидный клей. Такие органические связующие имеют малую радиационную стойкость и быстро разрушаются. Также применяют нанесение порошка люминофора на подложку из суспензии (золя) в летучей жидкости без нелетучего связующего, после удаления которой порошок удерживается благодаря сравнительно слабым электростатическим и вандер-ваальсовым силам. Попытки повысить прочность покрытия путем спекания порошка, как правило, приводят к ухудшению его характеристик из-за химического взаимодействия с подложкой (обычно силикатным стеклом).

В настоящей работе впервые опробовано закрепление слоя сцинтиллятора, состоящего из порошка BGO субмикронного размера, на подложке из плавленного кварца путем импульсного лазерного облучения слоя. Показано влияние режима обработки на морфологию и кинетические характеристики сцинтиллятора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза высокодисперсного BGO использовали метод соосаждения аммиаком из азотнокислых растворов висмута и германия, подробно описанный в [15]. В качестве исходных реактивов были взяты Bi_2O_3 (99.9%, Aldrich), GeO_2 (99.98% Aldrich), 70% HNO_3 (ГОСТ 11125-84, Химмед) и водный раствор 28%-ного NH_3 (ГОСТ 24147-80, Химмед). Навеску 0.3136 г Bi_2O_3 растворяли в 2 мл 35%-ной азотной кислоты. Навеску 0.1008 г GeO_2 суспензировали в 10 мл воды и затем прибавляли 800 мкл 10%-ного раствора аммиака, что приводило к растворению оксида. В результате сливания полученных растворов оксида висмута и оксида германия получали истинный раствор, к которому медленно прикапывали 30 мл 10%-ного раствора аммиака. Полученный осадок выдерживали в маточном растворе (состаривали) при постоянном перемешивании в течение суток. После отделения на центрифуге осадок высушивали при 50°C в течение 5 ч. Фазовый состав полученного продукта определяли методом РФА с помощью дифрактометра

Bruker D8 Advance (CuK_α -излучение, Ni-фильтр и LYNXEYE-детектор). Данные дифракции были собраны в диапазоне углов 2θ от 5° до 75° с шагом 0.015° , временем накопления 0.3 с/шаг. Идентификацию дифракционных максимумов проводили с использованием базы данных PDF-2. Морфологию и элементный состав изучали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Carl Zeiss NVision40, оснащенного детектором Oxford Instruments X-Max для проведения EDX-анализа.

Анализ состава и термической стабильности молекул, адсорбированных на поверхности полученных порошков ВГО, был проведен с использованием метода ТГ–МС на установке STA 449 F1 NETZSCH Jupiter TGA в сочетании с MS QMS 403C-Aeolos (NETZSCH).

Для лазерной обработки использовали установку с полупроводниковым лазером с длиной волны 445 нм и мощностью 5 Вт, излучение которого фокусировалось с помощью объектива с фокусным расстоянием 50 мм в пятно размерами 250×50 мкм, ориентированное под углом 45° к координатным осям. С помощью координатного привода лазерная головка могла перемещаться с шагом 75 мкм по обеим координатам, что позволяло осуществлять сканирование по площади, подвергая обработке поверхности размером до 150×150 мм. Средняя мощность лазерного излучения была установлена на 5% от максимальной с помощью широтно-импульсной модуляции на частоте 10 кГц путем изменения коэффициента заполнения.

Сравнение интенсивности сцинтилляций проводили следующим образом. Стекло со слоем порошка помещали на горизонтально расположенный фотокатод ФЭУ измерительного стенда. Далее непосредственно на слой порошка помещали источник α -частиц, в качестве которого использовали препарат, содержащий 12 кБк ^{241}Am , герметизированный тонкой напыленной пленкой титана (применяется в детекторах дыма типа HIS-07). Стенд затемняли, включали источник высокого напряжения и с помощью осциллографа регистрировали импульсы фототока ФЭУ. В случае низкого уровня сигнала (например, для порошка ВГО до лазерной обработки) использовали напряжение на аноде ФЭУ 1300 В, в остальных случаях использовалось напряжение 1000 В. При уровне дискриминации, соответствующем 10 амплитудам одноэлектронного импульса, скорость счета импульсов составляла около 2500–3000 имп./с, тогда как в отсутствие препарата импульсы такой амплитуды не регистрировались. При этом чувствительность к β - и γ -излучению практически отсутствовала: источник β - и γ -излучения ОСГИ-3 активностью 50 кБк цезия-137, поднесенный вплотную к слою порошка ВГО снаружи установки (через слой Al-фольги толщиной 50 мкм), не вызывал увеличения скорости счета ни при каком уровне

дискриминации. Для определения средней амплитуды импульсов сцинтилляций устанавливали уровень синхронизации осциллографа таким образом, чтобы средняя частота запуска (измеряемая встроенным частотомером) была одинакова в каждом измерении (около 100 имп./с). За оцениваемую величину принимали разницу между порогом дискриминации и средним уровнем шума “нулевой” линии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Синтезированные частицы представляли собой сросшиеся агломераты квазисферической формы размером 0.5–0.8 мкм, состоящие из наноразмерных кристаллитов (рис. 1а). РФА подтвердил однофазность полученного высокодисперсного порошка ВГО (рис. 1б).

На подложки из оптического кварцевого стекла методом полива помещали одинаковые количества суспензии синтезированного порошка ВГО (0.5 ± 0.05 мг) в 0.5 мл изопропанола (Химмед, “ос.ч.”) таким образом, чтобы обеспечить равные площади нанесения. После сушки при комнатной температуре или при слабом подогреве под рефлекторной лампой слои имели визуальную одинаковую плотность, были полупрозрачными и достаточно прочно удерживались на поверхности кварцевого стекла. Толщина слоя порошка составляла ~ 50 мкм.

Лазерная обработка слоя порошка при мощности лазера 5 Вт и широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с коэффициентом заполнения 5% осуществлялась в следующих режимах: I – при экспозиции на точку 2 мс количество проходов изменяли от 1 до 4; II – один проход со временем экспозиции 1, 3, 5, 8 или 12 мс.

Общий вид слоев порошка, подвергнутых обработке в режимах I и II, приведен на рис. 2. В результате лазерной обработки слой порошка визуально темнеет и становится более прозрачным. Степень этого изменения растет с экспозицией и числом проходов. Обработка в несколько проходов приводит к меньшему потемнению, чем та же суммарная экспозиция за один проход. При значительных экспозициях (более 8 мс) визуально заметно испарение материала с образованием белого дыма. Увеличение коэффициента заполнения ШИМ до 10% и более с экспозицией свыше 2 мс приводит к повреждению материала подложки, при этом порошок ВГО частично разлагается. На подложке остается налет металлического вида.

Изучение поверхности слоя методом электронной спектроскопии показало, что под действием лазерного излучения происходит испарение не только ВГО, но и материала подложки. Испаренное вещество конденсируется над поверхностью подложки, при этом на РЭМ-изображениях можно видеть формирование сфериче-

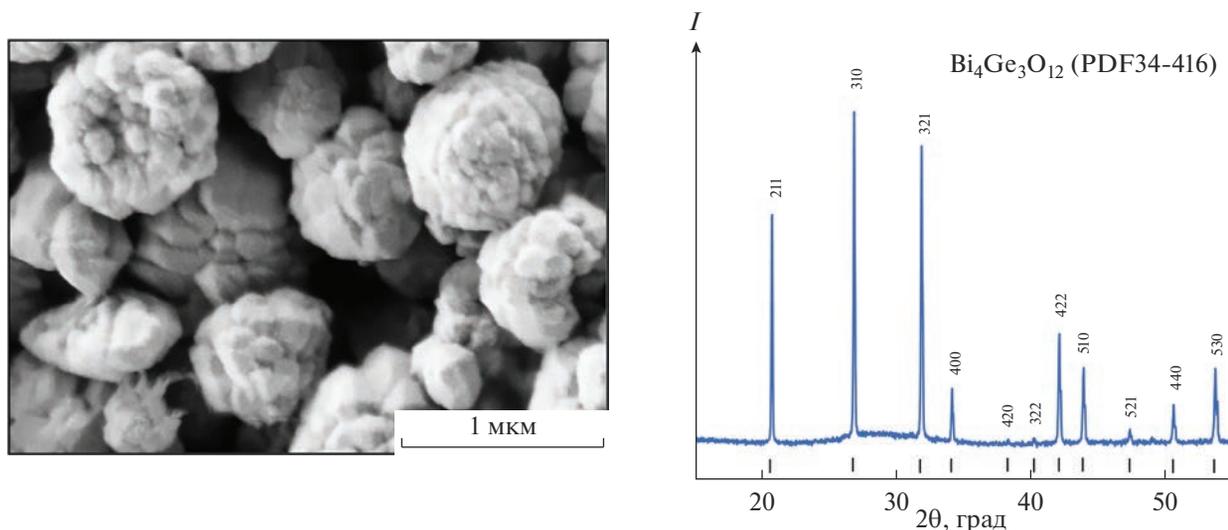


Рис. 1. Микрофотографии синтезированных частиц BGO (а) и дифрактограмма синтезированного поликристаллического BGO (штрихами обозначено положение рефлексов на дифрактограмме BGO в соответствии с PDF 34-416) (б).

ских частиц (рис. 3). Эти сферические частицы соединены тонкими нитями, создающими плотную “паутину” над поверхностью слоя (рис. 3, 4). По данным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), состав сферических частиц строго соответствует ортогерманату висмута, а “нитей” – оксиду кремния. Отсутствие примеси кремния в сферических частицах является положительным результатом, поскольку известно, что соединение Bi₄Si₃O₁₂ (структурный аналог BGO) уступает ортогерманату висмута по своим сцинтилляционным свойствам [21].

С ростом числа проходов или увеличением времени экспозиции до 5 мс происходит рост сферических частиц. “Паутина” SiO₂ оседает на их поверхности, а также на слое еще неиспарившегося материала, связывая тем самым подложку и нанесенный на нее BGO. Дальнейшее увеличение времени экспозиции (≥8 мс, режим I) приводит к перегреву порошка, и размер частиц заметно уменьшается. В случае режима II при суммарной экспозиции (≥8 мс), набранной за несколько проходов, образцы не успевали нагреться до температуры разложения. С ростом числа проходов наблюдаются слияние отдельных сферических частиц с образованием крупных капель неправильной формы и уплотнение окружающей их SiO₂-“паутины” (рис. 4).



Рис. 2. Общий вид образцов порошка BGO после лазерной обработки в режимах I (а) и II (б), цифрами обозначены поля с различным количеством проходов (а) и поля с различным временем экспозиции (б).

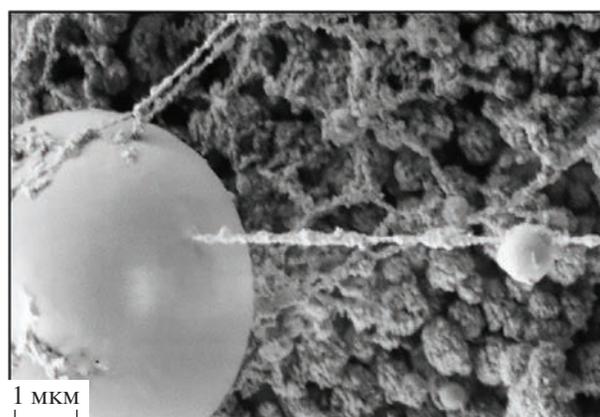


Рис. 3. Поверхность слоя BGO после лазерного облучения в течение 2 мс.

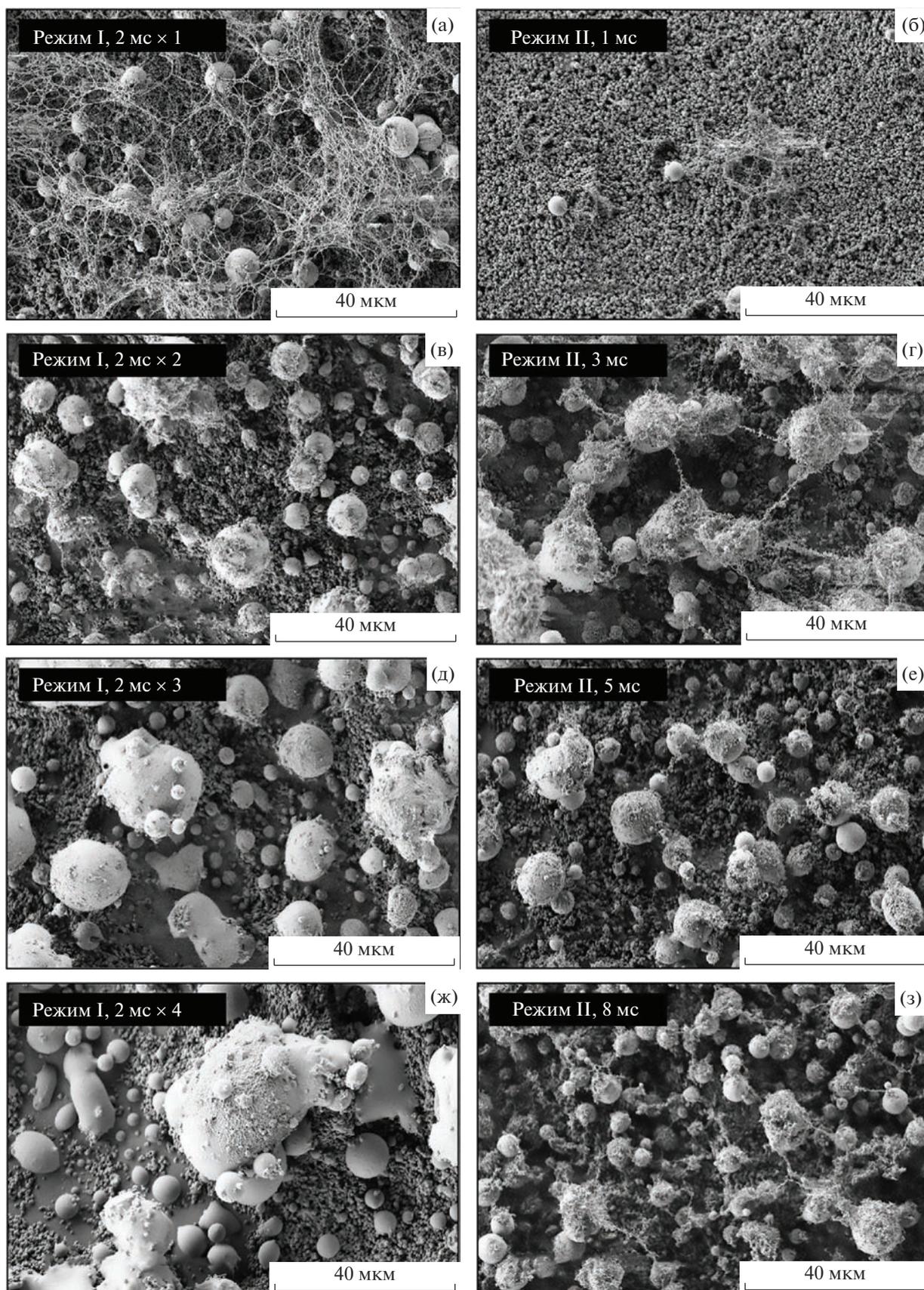


Рис. 4. Микрофотографии слоев ВГО после обработки лазерным излучением (мощностью 5 Вт) в режимах I и II.

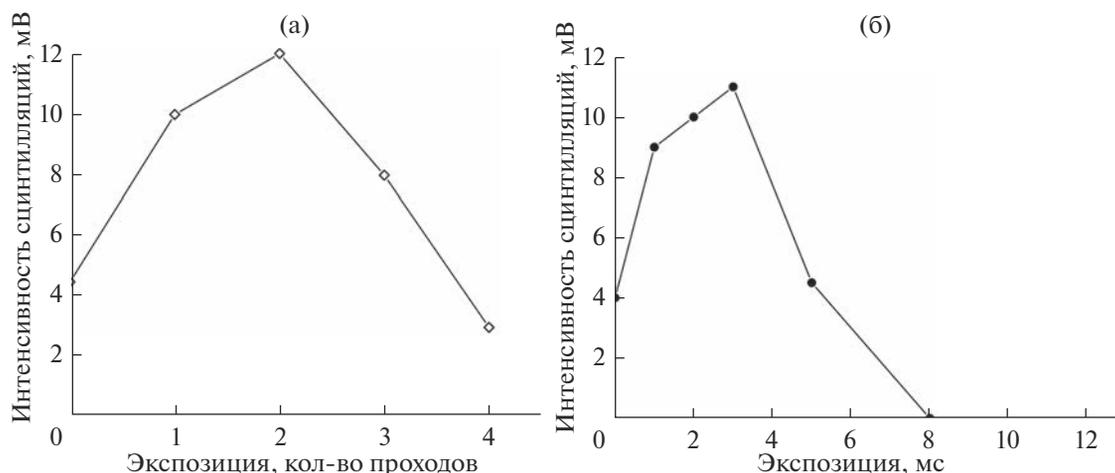


Рис. 5. Зависимости интенсивности сцинтилляций от экспозиции при режимах лазерной обработки I (а) и II (б); на графике (б) точка, соответствующая 2 мс, перенесена с графика (а).

В результате лазерной обработки в режиме I амплитуда сцинтилляций с 4–4.5 мВ на исходном образце возрастает до 10 мВ при одном проходе лазерного облучения с экспозицией 2 мс и до 12 мВ при двух проходах (рис. 5а). Дальнейшее увеличение количества проходов привело к падению интенсивности. При обработке в режиме II также наблюдался первоначальный рост амплитуды импульсов, максимум которой 11 мВ наблюдался при экспозиции 3 мс. При увеличении экспозиции до 5 мс амплитуда импульсов падала до 4.5 мВ, а при 8 мс и более сцинтилляций не наблюдалось (рис. 5б).

Повышение интенсивности сцинтилляций в результате лазерной обработки, по-видимому, вызвано сочетанием двух причин. Первой из них является удаление из структуры частиц ортогерманата висмута воды, вызывающей сильное тушение люминесценции. Удаление происходит за счет нагре-

вания порошка до высоких температур в ходе лазерной обработки. На кривых ТГ–МС (рис. 6) видно, что при нагревании порошка ВГО до 150°C и более действительно происходит удаление молекул воды и соединений азота, сохранившихся на поверхности частиц после осаждения. Помимо этого, частичное испарение и плавление микрокристаллов ВГО под действием лазерного излучения приводят к значительному, наблюдаемому в т.ч. визуально, увеличению прозрачности покрытия, повышающему эффективность светосбора “на просвет”, при расположении фотоприемника по другую сторону от препарата, испускающего α -частицы, возбуждающие сцинтилляцию.

Временные характеристики сцинтилляции не зависят от режима лазерной обработки (рис. 7). Наблюдается лишь небольшое улучшение кинетических параметров. Так, времена высвечивания сцинтилляции для исходного порошка ВГО, полученного методом соосаждения, составляют 61 нс (85%) по быстрой компоненте и 346 нс (15%) по медленной. Для образца, облученного 2 раза по 20 мс (I режим), времена высвечивания составили 52 нс (87%) по быстрой компоненте и 319 нс (13%) по медленной. Данный результат может быть связан с интенсивным дефектообразованием при быстрой закалке расплава, образовавшегося при лазерном облучении, однако изменения кинетических параметров весьма незначительные и также могут быть обусловлены приборной погрешностью при измерении.

Для сравнения кинетики сцинтилляции был изготовлен эталонный образец – порошок перетертого монокристаллического ВГО с размером частиц 1–4 мкм. Как видно на рис. 7, синтезированный нами исходный порошок так же как и порошок, прошедший импульсную лазерную обработку, заметно превосходит перетертый из монокристалла

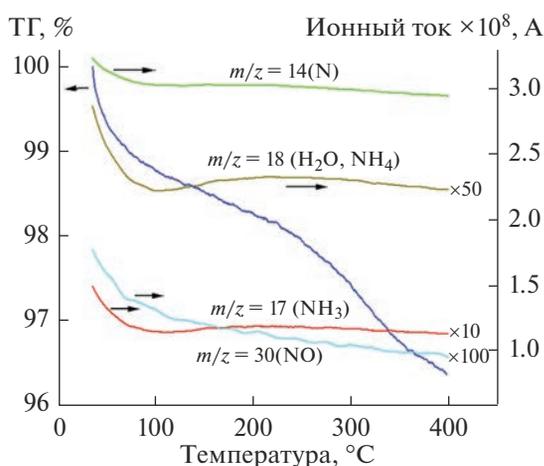


Рис. 6. Результаты ТГ–МС для исходного образца ВГО, до лазерной обработки.

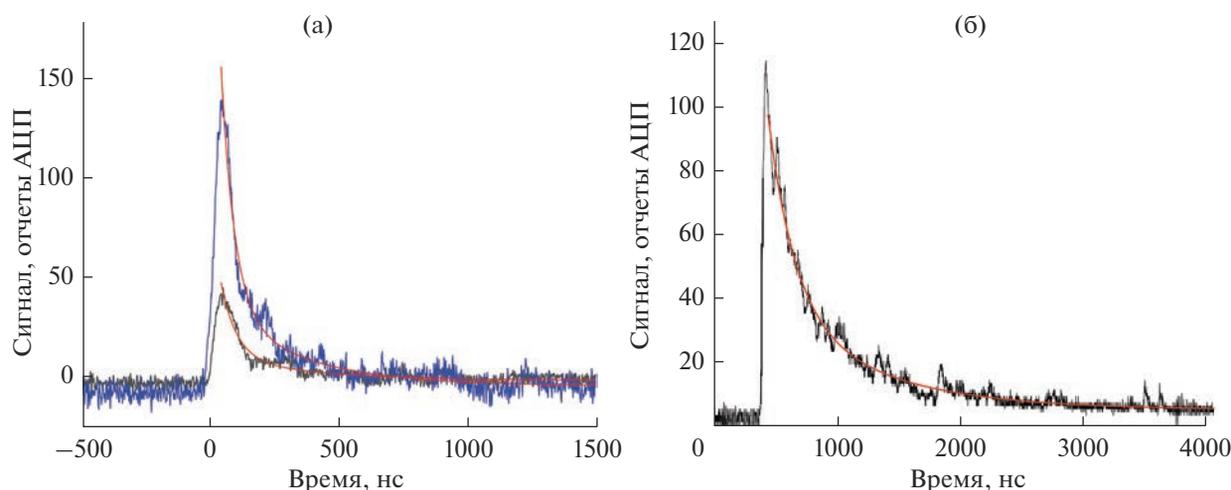


Рис. 7. Осциллограммы сцинтилляций исходного порошка (черная) и после лазерной обработки в течение 2 мс (синяя) (а) и перетертого из монокристалла ВГО (б) при возбуждении альфа-частицами (графики приведены к одинаковым значениям световой чувствительности).

по временным характеристикам, но уступают в интенсивности высвечивания. Существенным недостатком эталонного образца являются большие времена высвечивания: 215 нс для быстрой компоненты, на которую приходится 66% от суммарной энергии сцинтилляционного импульса, и 848 нс для медленной. Высокие кинетические характеристики высокодисперсных образцов ВГО по сравнению с монокристаллическими уже были показаны нами ранее в случае γ -облучения [22], также известно о зависимости световыхода от степени дефектности кристаллитов и об изменении кинетических характеристик люминесценции по сравнению с монокристаллами того же состава и для других высокодисперсных неорганических люминофоров [23–26].

Таким образом, синтезирован высокодисперсный порошок и путем импульсного лазерного облучения получены сцинтилляционные слои ортогерманата висмута. Несмотря на меньшую интенсивность высвечивания по сравнению с перетертым монокристаллическим образцом, по своим кинетическим характеристикам они существенно его превосходят, что делает их привлекательными для использования в качестве высокочувствительных сцинтилляционных экранов для регистрации α -излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработана методика иммобилизации порошка ортогерманата висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ на кварцевой подложке методом импульсного лазерного облучения. Показано, что при лазерной обработке происходит испарение материала кварцевой подложки, что приводит к эффективной иммобилизации частиц

ВГО без нарушения их стехиометрии. При лазерной обработке в оптимальном режиме интенсивность сцинтилляций возрастает в три раза по сравнению с исходным порошком, а также улучшаются кинетические характеристики: сокращается длительность медленной компоненты высвечивания и несколько возрастает ее доля в общей интенсивности, что обеспечивает высокую скорость счета событий.

Полученный материал обеспечивает большую стойкость детектора к воздействию влаги и воздуха по сравнению с коммерческими аналогами при сравнимой или более высокой эффективности детектирования. Использование порошкообразного ВГО позволяет существенно удешевить материал. Полученные сцинтилляционные экраны могут быть использованы для создания малогабаритных сцинтилляционных детекторов радона с высокой чувствительностью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ИОНХ РАН и ГЕОХИ РАН.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vajda N., Pöllänen R., Martin P., Kim C.K.* Alpha Spectrometry // Handbook of Radioactivity Analysis. N.Y.: Academic, 2020. P. 493–573.

2. *Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Bays-sen H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock M., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaf-frath Rosario A., Tirmarche M., Tomáscaronek L., Whit-ley E., Wichmann H.-E., Doll R.* Radon in Homes and Risk of Lung Cancer: Collaborative Analysis of Indi-vidual Data from 13 European Case-Control Studies // *BMJ*. 2005. V. 330. № 7485. P. 223–227. <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
3. *Haedev S., Jasmine V.* Radon Estimation in Some Lakes and Fraser River Water of British Columbia, Canada Using LR-115 Type II Alpha Track Detector // *Res. Rev.: J. Toxicol.* 2023. V. 12. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.37591/RRJoT>
4. *Gulan L., Forkapić S., Spasić D., Živković Radovanović J., Hansman J., Lakatoš R., Samardžić S.* Identification of High Radon Dwellings, Risk of Exposure, and Geo-genic Potential in the Mining Area of the “TREPČA” Complex // *Indoor Air*. 2022. V. 32. № 7. P. e13077. <https://doi.org/10.1111/ina.13077>
5. *Reste J., Pavlovska I., Martinsone Z., Romans A., Mar-tinsons I., Vanadzins I.* Indoor Air Radon Concentra-tion in Premises of Public Companies and Workplaces in Latvia // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. V. 19. № 4. P. 1993. <https://doi.org/10.3390/ijerph19041993>
6. *Radzhapov B.S., Radzhapov S.A., Mullagalieva F.G., Zufarov M.A.* The Development of Semiconductor De-tectors for Radiometers of Alpha-Radiation and the Examination of the Volumetric Activity of Radon in Various Areas // *Radiat. Detection Technol. Methods*. 2023. P. 1–7. <https://doi.org/10.1007/s41605-023-00406-z>
7. *Sukanya S., Joseph S.* Environmental Radon: A Tracer for Hydrological Studies in Radon Measurement Tech-niques. N.Y.: Springer Nature, 2023. P. 29–51.
8. *Hassanpour M., Dehghanipour P., Rezaie M., Hassan-pour M., Faruque M.R.I., Khandaker M.U.* Study of Al-pha Spectrometry for Detection of Radon and Progeny Using Gas Micro-strip Detector // *Appl. Radiat. Isot.* 2022. V. 187. P. 110344. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110344>
9. *Weber M.J., Monchamp R.R.* Luminescence of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$: Spectral and Decay Properties // *J. Appl. Phys.* 1973. V. 44. № 12. P. 5495–5499. <https://doi.org/10.1063/1.1662183>
10. *Bakkum E.A., Van Engelen C.P.M., Kamermans R., Teeling T.A., Timmerman L.J.M.* The Response of BGO Scintillation Detectors to Light Charged Particles // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 1984. V. 225. № 2. P. 330–334. [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(84\)90271-0](https://doi.org/10.1016/0167-5087(84)90271-0)
11. *Cardani L., Di Domizio S., Gironi L.* A BGO Scintillat-ing Bolometer for γ and α Spectroscopy // *JINST*. 2012. V. 7. № 10. P. 10022. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/10/P10022>
12. *Coron N., García E., Gironnet J., Leblanc J., de Marcil-lac P., Martinez M., Ortigoza Y., Ortiz de Solórzano A., Pobes C., Puimedón J., Redon T., Sarsa M.L., Torres L., Villar J.* A BGO Scintillating Bolometer as Dark Matter Detector Prototype // *Opt. Mater.* 2009. V. 31. № 10. P. 1393–1397. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2008.09.016>
13. *Usuda S., Mihara A., Abe H.* Rise Time Spectra of α and β (γ) Rays from Solid and Solution Sources with Several Solid Scintillators // *Nucl. Instrum. Methods. Phys., Sect. A* 1992. V. 321. № 1–2. P. 247–253. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)90396-L](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)90396-L)
14. *DeVol T.A., Chotoo S.B., Fjeld R.A.* Evaluation of Gran-ulated BGO, GSO: Ce, YAG: Ce, CaF_2 : Eu and ZnS: Ag for Alpha/Beta Pulse Shape Discrimination in a Flow-cell Radiation Detector // *Nucl. Instrum. Meth-ods. Phys., Sect. A*. 1999. V. 425. № 1–2. P. 228–231. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01380-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01380-1)
15. *Veselova V.O., Gajtko O.M., Volodin V.D., Shafranov M.A., Egorysheva A.V.* A One-step Synthesis of Dispersed Bis-muth Orthogermanate Powder and Its Performance for Alpha- and Gamma-Radiation Detection // *Chemis-trySelect*. 2023. V. 8. P. e202204590. <https://doi.org/10.1002/slct.202204590>
16. *Crookes W.* On Radiant Matter; a Lecture Delivered to the British Association for the Advancement of Sci-ence, at Sheffield, Friday, August 22, 1879 // *Am. J. Sci.* 1879. V. 3. № 106. P. 241–262.
17. *Shimaoka T., Kaneko J.H., Izaki K., Tsubota Y., Hi-guchi M., Nishiyama S.* Development of Scintillator Plates with High Energy Resolution for Alpha Particles Made of GPS Scintillator Grains // *Nucl. Instrum. Methods. Phys., Sect. A*. 2014. V. 735. P. 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.09.030>
18. *Kaneko J.H., Izaki K., Toui K., Shimaoka T., Morishita Y., Tsubota Y., Higuchi M.* An Alpha Particle Detector Based on a GPS Mosaic Scintillator Plate for Continu-ous Air Monitoring in Plutonium Handling Facilities // *Radiat. Meas.* 2016. V. 93. P. 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.07.006>
19. *Komendo I., Bondarev A., Fedorov A., Dosovitskiy G., Gurinovich V., Kazlou D., Kozhemyakin V., Mechinsky V., Mikhlin A., Retivov V., Schukin V., Timochenko A., Mu-rashev M., Zharova A., Korzhik M.* New Scintillator ${}^6\text{Li}_2\text{CaSiO}_4\text{:Eu}^{2+}$ for Neutron Sensitive Screens // *Nucl. Instrum. Methods. Phys., Sect. A*. 2023. V. 1045. P. 167637. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167637>
20. *Fedorov A., Komendo I., Amelina A., Gordienko E., Gurinovich V., Guzov V., Dosovitskiy G., Kozhemyakin V., Kozlov D., Lopatik A., Mechinsky V., Retivov V., Smyslo-va V., Zharova A., Korzhik M.* GYAGG/ ${}^6\text{LiF}$ Compos-ite Scintillation Screen for Neutron Detection // *Nucl. Eng. Tech.* 2022. V. 54. № 3. P. 1024–1029. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.024>
21. *Ivanov V.Y., Kruzhalov A.V., Pustovarov V.A., Petrov V.L.* Electron Excitation and Luminescence in $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ and $\text{Bi}_4\text{S}_{13}\text{O}_{12}$ Crystals // *Nucl. Instrum. Methods. Phys., Sect. A*. 1987. V. 261. № 1–2. P. 150–152. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(87\)90585-7](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90585-7)
22. *Veselova V.O., Gajtko O.M., Volodin V.D., Egorysheva A.V.* Effect of Different Organic Additives on the Shape, Size and Scintillation Properties of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ Powders Syn-thesized by the Microwave-Hydrothermal Method // *Adv. Powder Tech.* 2021. V. 32. № 1. P. 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.11.028>
23. *Александров А.А., Маякова М.Н., Кузнецов С.В., Во-ронов В.В., Поминова Д.В., Иванов В.К., Федоров П.П.*

- Влияние совершенства кристаллических порошков люминофора $\beta\text{-NaYF}_4:\text{Yb},\text{Er}$ на эффективность ап-конверсионной люминесценции // Неорган. материалы. 2022. Т. 58. № 1. С. 95–101.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X22010018>
24. *Гырдасова О.И., Калинин М.О., Акулов Д.А., Абашев Р.М., Сурдо А.И., Келлерман Д.Г.* Влияние условий синтеза на термолюминесценцию LiMgPO_4 // Журн. неорган. химии. 2023. Т. 68. № 2. С. 277–282.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X22601754>
25. *Карпов И.В., Ушаков А.В., Федоров Л.Ю., Гончарова Е.А., Брунгардт М.В.* Исследование параметров вакуумно-дугового осаждения и их влияние на структурные и оптические частицы NiO // Неорган. материалы. 2022. Т. 58. № 8. С. 822–828.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X22080036>
26. *Ашууров М.Х., Нурутдинов И., Бойбобоева С.Т., Саидахмедов К.Х.* Исследование оптических свойств монокристаллов и нанокерамики твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{-YbF}_3$ // Неорган. материалы. 2022. Т. 58. № 8. С. 917–923.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X22080012>