

МЕТОДЫ СИНТЕЗА ЛЮМИНОФОРОВ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Тарасова Д.А., Никифоров А.Л., Легкова И.А., Колобов М.Ю.

Тарасова Дарья Андреевна, Никифоров Александр Леонидович, Легкова Ирина Анатольевна
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Иваново, Россия, 153040, Ивановская область, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33.
E-mail: darlingoov@mail.ru, anikiforoff@list.ru; legkovai@mail.ru
Колобов Михаил Юрьевич
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия, 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметьевский, д. 7.
E-mail: mikhaikolobov@rambler.ru

В статье представлены результаты сравнительного исследования методов синтеза люминофоров, используемых в сигнальных материалах для облегчения поиска пострадавших. Выбор метода осуществляется исходя из требований, предъявляемых к характеристикам готового сигнального изделия. В работе рассмотрены такие методы синтеза как золь-гель/метод Печини, твердофазная реакция, сольвоотермальная реакция, соосаждение, сонохимический синтез, микроволновые методы и методы синтеза горения. Особое внимание уделяется твердофазному методу синтеза, который подходит для массового производства люминофоров из смеси твердых исходных материалов. Полученные таким методом люминофоры отличаются высокой стабильностью, дисперсностью и сравнительно невысокой стоимостью. Для получения люминофоров с заданными свойствами может быть рекомендовано использование технологии золь-гель синтеза.

Ключевые слова: люминофоры, методы синтеза, сигнальный материал, твёрдотельный метод, золь-гель метод, метод сжигания, соосаждение, гидротельный метод

METHODS OF PHOSPHOR SYNTHESIS: COMPARATIVE RESEARCH

Tarasova D.A., Nikiforov A.L., Legkova I.A., Kolobov M.Yu.

Tarasova Darya Andreevna, Nikiforov Alexander Leonidovich, Legkova Irina Anatolyevna
Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFS of Emercom of Russia,
Ivanovo, Russia, 153040, Ivanovo region, Ivanovo, Stroiteley Ave., 33.
E-mail: darlingoov@mail.ru, anikiforoff@list.ru; legkovai@mail.ru
Kolobov Mikhail Yurievich
Ivanovo State University of Chemical Technology,
Ivanovo, Russia, 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetyevsky Ave., 7.
E-mail: mikhaikolobov@rambler.ru

The article presents the results of a comparative study of the methods for synthesizing luminophores used in signal materials to facilitate the search for victims. The method is selected based on the requirements for the characteristics of the finished signal product. The work considers such synthesis methods as sol-gel/Pechini method, solid-phase reaction, solvothermal reaction, coprecipitation, sonochemical synthesis, microwave methods and combustion synthesis methods. Particular attention is paid to the solid-state synthesis method, which is suitable for mass production of luminophores from a mixture of solid source materials. The luminophores obtained by this method are highly stable, dispersed and relatively inexpensive. To obtain luminophores with specified properties, it is recommended to use sol-gel synthesis technology.

Key words: luminophores, synthesis methods, signal material, solid-state method, sol-gel method, combustion method, coprecipitation, hydrotel method

В статьях [1-4] нами было предложено использование люминофоров в качестве сигнальных материалов в специальных изделиях защиты человека с целью визуализации в темное время суток для облегчения поиска пострадавших (зблудившихся, потерпевших катастрофу и т.д.). Выбор люминофора является важной и ответственной операцией, от правильного выбора цвета излучения и длительности свечения зависит эффективность поисково-спасательных работ.

Следует отметить, что среди многообразия люминофоров для решения нашей задачи подходит лишь класс фотолюминофоров. Явление фотолюминесценции определяется как последующее возбуждение и девозбуждение (излучение) электрона, находящегося в основном состоянии, за

счет поглощения фотона. В процессе девозбуждения (излучения) в видимой области электромагнитного спектра выделяется дополнительный фотон. Другими словами, оно также определяется как оптическое излучение, испускаемое физической структурой, возникающей из-за возбуждения до неравновесного состояния при освещении светом. Этот процесс протекает в трех циклах:

- образование наборов электронно-дырочных пар путем удержания возбуждающего света;
- радиационная рекомбинация наборов электронно-дырочных пар;
- удаление рекомбинационного излучения.

Возбуждение и излучение – это два типа спектров люминесценции, которые изображены на рис. 1. [5].

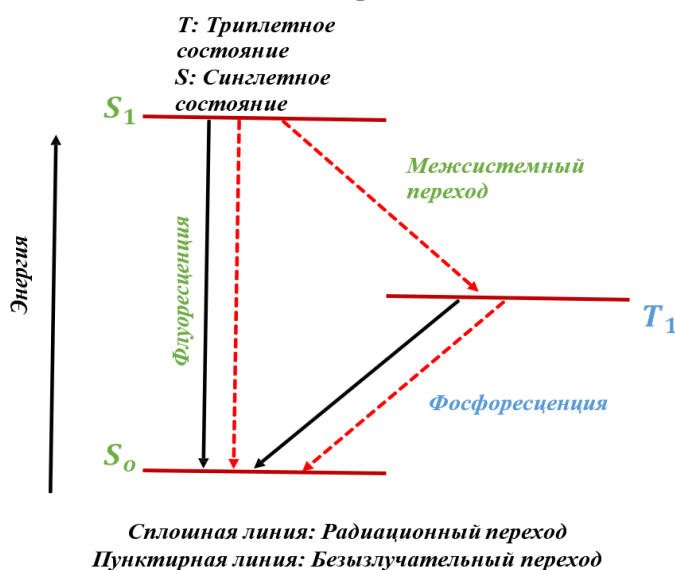


Рис. 1. Механизм флуоресценции и фосфоресценции
Fig. 1. Mechanism of fluorescence and phosphorescence

Для правильного подбора люминофора, используемого в сигнальном изделии, необходимо знать основные химические и физические свойства данных соединений, способы их синтеза и технические показатели. В настоящее время широкое применение находят органические люминофоры, однако более высокую стабильность и надежность демонстрируют классические неорганические соединения. Следует отметить, что люминофоры, которые являются чистыми неорганическими соединениями, могут быть получены различными способами, что оказывает влияние на характеристики готового продукта.

Выбор метода получения тех или иных люминофоров осуществляется исходя из требований, предъявляемых к характеристикам готового сигнального изделия.

Задача синтеза осложняется тем, что большинство люминофоров в выпускной форме содержат более четырех элементов. Поэтому получение однородных однофазных порошков такого типа является сложной технической задачей [6]. Эффективность люминесценции материалов определяется их характеристиками, которые определяются атомной структурой, составом, микроструктурой, дефектами и границами раздела, на которые влияет процесс синтеза [7]. Более того, для люминофоров используются различные типы решеток-хозяев, такие как оксиды, алюминаты, силикаты, сульфиды, алюмосиликаты, нитриды и т.д. Помимо разных типов хостов, в него также вводится небольшое количество иона-активатора. Именно активатор определяет спектральные характеристики люминофоров.

Таким образом, падающее излучение, получаемое решеткой хозяина, передается непосредственно на ион-активатор. Наиболее популярными ионами-активаторами, отвечающими за образование решетчатых люминофоров разных цветов, являются элементы - европий, тербий, самарий, церий и так далее. Так, например, решетка, содержащая европий в качестве активатора, обычно имеет красный цвет и, таким образом, излучает оранжево-красный свет; аналогично зеленые и синие светоизлучающие люминофоры решетки

содержат тербий и церий, соответственно, в качестве ионов-активаторов. Обычные методы синтеза включают золь-гель/метод Печини [8], твердофазную реакцию, сольвотермальную реакцию, соосаждение, сонохимический синтез, микроволновые методы и методы синтеза горения. Среди всех упомянутых способов наиболее удобной считается твердофазная реакция. В таблице приведено сравнение методов синтеза по размерам частиц, гранулометрическому составу, морфологическому контролю, времени синтеза и т.д. [9].

Таблица

**Сравнение методов синтеза
Table. Comparison of synthesis methods**

Метод синтеза	Размер частиц	Распределение частиц по размерам	Морфологический контроль	Время синтеза	Подходящие люминофоры	Ограничения
Твердотельный метод (SS)	> 5 мкм	Узкая полоса	Плохой	Короткая длина	Все соединения	Требуется обширное шлифование и фрезерование
Золь-гель метод (SG)	10 нм – 2 мкм	Узкий	Средний	Средняя	Все соединения, кроме нитридов	Требуется растворимый прекурсор
Метод сжигания (CS)	500 нм – 2 мкм	Средний	Плохой	Короткая	Все соединения, кроме нитридов	Требуется растворимый прекурсор
Соосаждение (CP)	10 нм – 1 мкм	Узкий	Очень хороший	Средняя	Оксиды и фториды	Требуется растворимый прекурсор
Гидротермальный (HT)	10 нм – 1 мкм	Узкий	Хороший	Очень длинная	Все соединения	Требуется растворимый прекурсор

Наиболее часто используемым методом получения люминофора из смеси твердых исходных материалов является твердотельный метод – простой процесс, который идеально подходит для массового производства, используется для изготовления люминофорных материалов, таких как оксиды, оксифториды, оксихлориды, оксинитриды и так далее. Как правило, люминофоры изготавливаются с использованием твердотельного синтетического процесса, основанного на высоких температурах. Это оказывает наибольшее влияние на физико-химические свойства получаемых соединений. Такой подход в основном используется для твердых светоизлучающих материалов, которые не могут быть синтезированы при комнатной температуре, но нуждаются в более высокой температуре процесса. Основной причиной, по которой изменяется скорость реакции и вероятность ее протекания, является свободная энергия, площадь поверхности используемых реагентов, условия

реакции, реакционная способность используемых химических соединений, а также структура синтезируемого материала.

С помощью этого процесса было получено большинство силикатных материалов, таких как $\text{La}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, а также многие другие материалы, такие как силикаты стронция с примесью европия [10].

Этапы синтеза заключаются в том, что оксиды металлов, кремний и примеси, сначала измельчаются, сжимаются и объединяются в растворе.

После этого механическую смесь химических реактивов заливают дважды дистиллированной водой и перемешивают при низкой температуре.

В качестве прекурсоров для понижения температуры применяются различные флюсы, такие как Li_2CO_3 , NH_4F , NH_4Cl , BaF_2 , H_3BO_3 и др., за счет чего добиваются увеличения скорости химической реакции, в результате которой получается прочная кристаллическая структура [10].

Для обеспечения равномерного смешивания реагентов часто используется ацетон. Поскольку обычная реакция при низких температурах протекает медленно, то твердофазный синтез проводят при повышенных температурах. При высокой температуре скорость диффузии реагентов увеличивается, энергия активации снижается, что в конечном счете приводит к увеличению скорости реакции синтеза люминофора. Для проведения твердотельной реакции, как правило, используются температуры порядка 1200-1600⁰C [10].

Прекурсоры в настоящее время легкодоступны, причем их использование не приводит к образованию радиоактивных отходов, т.е. мы имеем дело с экологически безопасным процессом, который позволяет получать термодинамиче-

ски стабильные материалы. Тем не менее, самым большим недостатком метода является тот факт, что химический процесс отнимает много времени и протекает при высокой температуре. Кроме того, на эффективность процесса оказывает влияние наличие примесей, а также неоднородность фазы и размера зерна люминофора, что негативно сказывается на качестве готового продукта. Еще одним недостатком данного метода является необходимость использования дорогостоящего и сложного оборудования. Проведение частой химической очистки кристаллических структур, предусмотренной в технологическом процессе, приводит к ухудшению показателей люминесценции. Графическое изображение всего процесса показано на рис. 2 [11].

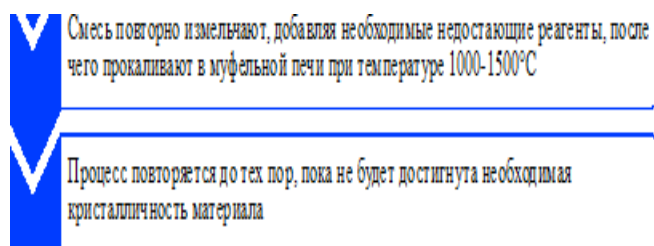


Рис. 2. Процесс протекания твердотельного метода
Fig. 2. The process of the solid-state method

Для получения ярких нанолюминофоров используют золь-гель метод, который является достаточно гибким, точным и экономически эффективным. Этот метод в основном используется для производства светоизлучающих люминофоров на основе диоксида кремния. Данная технология также применяется для синтеза других светоизлучающих материалов, обладающих решетками таких соединений, как сульфиды, окисульфиды, бораты, вольфраматы, галогениды, фосфаты и другие соединения. Процесс обычно используется для изготовления нано/микроразмерных люминофоров с постоянным распределением частиц [12]. Такой подход предполагает комбинирование растворов прекурсоров с хелатирующим реагентом и поверхностно-активным веществом (ПАВ) в чистой воде. Наиболее часто в качестве хелатирующего агента в сочетании с ПАВ в синтезе люминофоров применяются лимонная кислота и полиэтиленгликоль. Технологический процесс заключается в том, что полученный раствор перемешивается при температуре около 80⁰C в течение некоторого времени. В завершении процесса происходит конденсация продуктов и формирование полимерной сетки, что приводит к образованию золя, который в конечном итоге превращается в гель. Гелеобразование происходит, когда раствор внезапно теряет свою текучесть и превращается в

неустойчивое твердое вещество. Термическая обработка используется для извлечения органического материала люминофора из конечного продукта. В соответствии с технологическим регламентом отжиг люминофоров проводят при температурах выше 500⁰C, а размер частиц и морфологию конечного продукта варьируют, изменяя соотношение между хелатирующим агентом, поверхностно-активным веществом и ионами металлов. В тех случаях, когда лантаноиды присутствуют в реакционной среде в виде оксидов, их обычно сначала превращают в нитриты. Процесс осуществляется за счет растворения стехиометрического объема оксида лантаноида в концентрированном растворе азотной кислоты.

Затем смесь нагревают при непрерывном перемешивании, после чего раствор разбавляют небольшим количеством дистиллированной воды. Несмотря на то, что золь-гель отличается высокой чистотой и качеством производимых люминофоров, его основным недостатком является длительность технологического процесса [8].

Еще одним эффективным, быстрым, простым и недорогим методом получения порошкообразных частиц люминофора с заданной морфологией является пиролиз распылением. Отличительная черта этого метода – возможность получения субмикронных и сферических люминофо-

ров. Еще одной важной особенностью процесса является способность синтезировать различные типы люминофоров на основе использования нанопорошков прекурсоров, хлорсиликатов и многокомпонентных оксидов [13]. Существует два подхода к получению люминофора этим методом, а именно: аэрозольный распыляемый пиролиз (АРП) и пламенный пиролиз (ФСП), который следует рассматривать как модифицированную версию ультразвукового пиролиза распылением. ФСП относится к наиболее распространенным методам изготовления нанолюминофоров на основе силикатов.

Для обеспечения стабильности соединения и усиления люминесценции в таком процессе на эмиссионное ядро силикатных материалов нано-

сится кремнеземное покрытие. С использованием аэрозольного генератора по такой технологии были получены легированный марганцем люминофор Zn_2SiO_4 , легированный европием люминофор $\text{Ca}_8\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4\text{Cl}_2$, а также люминесцентные материалы на основе силикатов стронция и бария, легированные Eu^{3+} .

Правильный синтез целевых нанолюминофоров по технологии пиролиза распылением включает в себя четыре этапа, заключающиеся в конденсации и испарения промежуточных продуктов, получение прекурсора и превращение его в оксид. На четвертой стадии формируется готовый люминофор. Принципиальная схема метода распыляемого пиролиза показана на рис. 3 [14].

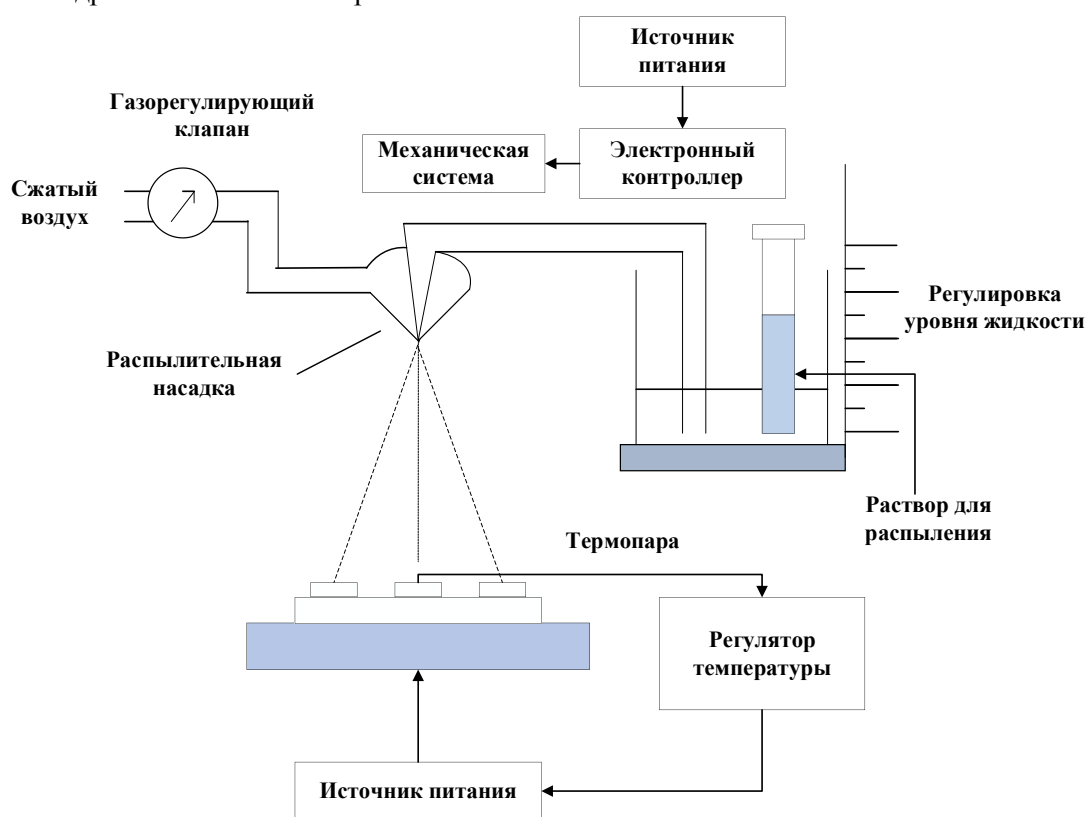


Рис. 3. Принципиальная схема метода распыляемого пиролиза
Fig. 3. Schematic diagram of the sprayed pyrolysis method

Экспериментальная установка включает в себя распылительную насадку, объединенную с фильтрующим устройством и горелочным ультразвуковым генератором для производства капель. Для образования аэрозоля-предшественника применяют нитраты металлов, ионы активатора и диоксид кремния, которые предварительно растворяют в дистиллированной воде, а затем помещают на ультразвуковой вибратор генератора. Окисление аэрозоля происходит путем пропускания через него кислорода и нагретых газов, которые за-

тем удаляются вакуумным насосом, а сухой остаток осаждается на кремниевых волокнах. Данные мероприятия обеспечивают однородность и чистоту получаемых материалов. Недостатком метода является высокая пористость получаемого люминофора, что оказывает негативное влияние на морфологию и термическую стабильность готового продукта. Для решения этой проблемы в настоящее время используется модифицированный метод распыляемого пиролиза для синтеза материалов с использованием искусственного колло-

идного раствора. Способ сжигания относится к числу влажных химических методов синтеза, не требующих дальнейшего кальцинирования. Он рассматривается как один из удобных методов синтеза, так как является более экономичным и энергоэффективным. В основу метода положена экзотермическая реакция, при этом тепло и свет способствуют получению многокомпонентных оксидов за короткий промежуток времени. По сравнению с твердотельными синтезированными порошками, авторами [1-4] было отмечено, что получаемые по такой технологии материалы обладают большой площадью поверхности, химической однородностью и имеют меньше примесей. Для синтеза горения основным требованием является выбор топлива и окислителя. Как правило, в качестве топлива и восстановителей используются азотная кислота и мочевины. Основная процедура включает в себя сжигание в среде нитратов металлов и топлива водного раствора прекурсоров. Процесс протекает при относительно низкой температуре, не превышающей 500°C. Это инициирует протекание экзотермической окислительной реакции, в результате которой температура реакционной среды возрастает до 1200°C, что увеличивает скорость реакции и сокращает время протекания процесса до 10 минут. В настоящее время аналогичным способом получают нанокристаллические порошки. Отмечается, что использование данной технологии способствует образованию слабых кластеров порошка субмикронного размера, который затем легко измельчается в более мелкие фракции. Рассмотренные методы синтеза неорганических люминофоров являются доста-

точно сложными и дорогостоящими, требуют использования специального оборудования и соблюдения технологической гигиены. Следует отметить, что получаемые таким образом продукты отличаются высоким качеством и стабильностью спектральных и цветовых характеристик. Такие люминофоры находят применение в специальной технике и имеют высокую стоимость. В то же время решение некоторых технических задач не предъявляет строгих ограничений к спектральным показателям и выпускным формам готовых люминофоров, но отдает предпочтение продуктам, имеющим низкую стоимость. Для создания сигнальных материалов [1-4], о которых речь шла в начале статьи подходит именно дешевые и доступные материалы, основным требованием к которым является длительность послесвечения.

Закономерно возникает вопрос: возможны ли более простые методы синтеза неорганических люминофоров? С уверенностью можно ответить утвердительно. Простые люминофоры могут быть получены в условиях химической лаборатории [15]. Для получения люминофоров с различным цветом излучения можно использовать следующие соли редкоземельных металлов:

- серноватистокислый стронций (голубовато-белый цвет послесвечения);
- серноватистокислый барий в сочетании с спиртовыми растворами азотнокислых урана и висмута (желто-зеленый цвет);
- углекислый стронций (светло-желтый цвет);
- спиртовой раствор азотнокислого висмута в сочетании с серой и гашеной известью (фиолетовый цвет).

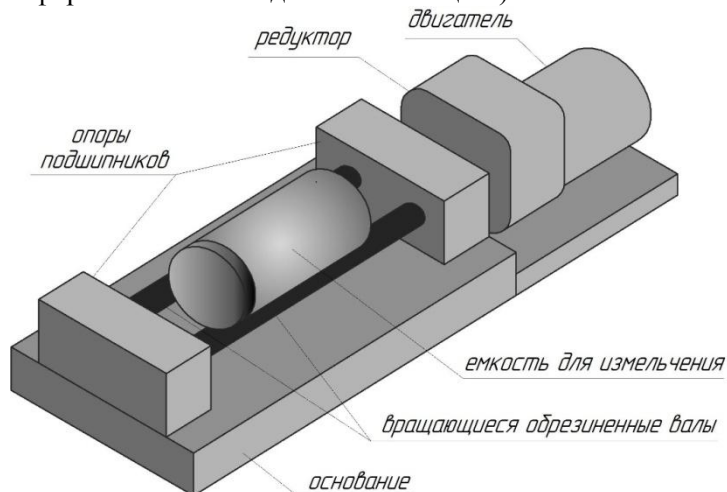


Рис. 4. Схема простейшей шаровой мельницы
Fig. 4. Diagram of the simplest ball mill

Технология получения готового люминофора заключается в прокаливании реакционной смеси при температуре порядка 500-700°C в течение 2-3 часов с последующим измельчением до нужного размера на шаровой мельнице. Схема простейшей шаровой мельницы приведена на рис. 4. Скорость вращения валов составляет не выше 60 об/мин., что обеспечивается использованием электродвигателя с редуктором. Емкостью, в которой происходит измельчение, может служить закрывающийся плотно стеклянный сосуд (банка, бутыл, пузырек и т.д.), куда загружаются полученный люминофор и агатовые шарики. Размер частиц определяется продолжительностью операции помола. Полученный мелкодисперсный порошок люминофора соединяется со связующим, в качестве которого могут быть использованы лаки промышленного производства, либо прозрачные полимеры. В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- для решения серьезных и ответственных задач можно рекомендовать использование промышленно выпускаемых люминофоров;

- установлено, что наибольший интерес для серийного производства сигнальных материалов представляют люминофоры, получаемые по твердотельной технологии; такие люминофоры отличаются высокой стабильностью, дисперсностью и сравнительно невысокой стоимостью;

- для получения единичных изделий визуализации объектов можно рекомендовать синтезировать люминофоры в условиях химической лаборатории.

- для получения люминофоров с заданными свойствами могут быть использованы технологии, основанные реализации на методе золь-гель синтеза.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасова Д.А., Никифоров А.Л. Использование средств визуализации в случае бедствий: преимущества органического люминофора. Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 285-290. EDN HUMZYJ.
2. Тарасова Д.А., Никифоров А.Л., Легкова И.А. Сигнальное полотно с элементами люминесцентного покрытия как метод достижения целей поисково-спасательных операций. Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 450-455. EDN XWXNVQ.
3. Тарасова Д.А., Никифоров А.Л., Легкова И.А. Плащ-накидка с люминофорным покрытием как сигнальное средство визуализации: область применения и оценка эффективности. Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. С. 100-104. EDN GKAFGT.
4. Тарасова Д.А., Никифоров А.Л., Легкова И.А. Использование люминофоров в области поисково-спасательных работ. Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. С. 497-502. EDN LHIXOQ.
5. Перцев А. Н., Писаревский А.Н., Резников И.В. и др. Эффективный метод регистрации слабых спектров люминесценции. Журнал прикладной спектроскопии. 1964. Т. 1. №. 4. С. 303-309.
6. Мурашкевич А.Н. Технология неорганических люминофоров: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2021. Ч. 1. 114 с.

REFERENCES

1. Tarasova D.A., Nikiforov A.L. Using visualization tools in case of disasters: the advantages of organic luminophore. Fire and emergency safety: collection of materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023. P. 285-290.
2. Tarasova D.A., Nikiforov A.L., Legkova I.A. A signal panel with luminescent coating elements as a method of achieving the goals of search and rescue operations. Modern fireproof materials and technologies: collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023. P. 450-455.
3. Tarasova D.A., Nikiforov A.L., Legkova I.A. Phosphor-coated raincoat as a signal visualization tool: scope of application and effectiveness assessment. Natural Sciences and fire safety: problems and prospects of research: a collection of materials of the All-Russian Scientific and practical conference with international participation. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2024. P. 100-104.
4. Tarasova D.A., Nikiforov A.L., Legkova I.A. The use of luminophores in the field of search and rescue operations // Topical issues of improving engineering systems for ensuring fire safety of objects: collection of materials of the X All-Russian scientific and practical conference. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023. P. 497-502.
5. Pertsev A. N., Pisarevsky A. N., Reznikov I. V., et al. An effective method for recording weak luminescence spectra. Journal of Applied Spectroscopy. 1964. V. 1. N 4. P. 303-309.
6. Murashkevich A.N. Technology of inorganic luminophores: a textbook. Minsk: BSTU, 2021. Part 1. 114 p.
7. Polyakov R.A., Borshchev O.V., Ponomarenko S.A. et al. Nanostructured luminophores: synthesis of molecules with a carbon branching center and the difference in their optical properties from organosilicon analogs. Kurchatov Interdisciplinary Youth Scientific School: Collection of ab-

7. Поляков Р.А., Борщев О.В., Пономаренко С.А. и др. Наноструктурированные люминофоры: синтез молекул с углеродным разветвляющим центром и отличие их оптических свойств от кремнийорганических аналогов. Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа: Сборник аннотаций. Москва: Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2023. С. 170. EDN SKTFLA.
8. Васина О.Ю. Золь-гель люминофоры на основе силикатов элементов второй группы. Москва, 2003. 187 с. EDN QDWWMJ.
9. Ye S., Xiao F., Pan Y.X., Ma Y.Y., Zhang Q.Y. Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: recent advances in materials, techniques and properties, *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 71 (2010) 1e34, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2010.07.001>.
10. Kantupitim P., Nakauchi D., Kato T. et al. Optical and scintillation characteristics of Tb-doped La₂Si₂O₇ single crystal. *Sens. Mater.* 2023. T. 35. С. 451-458.
11. James S.L., Adams Ch.J., Bolm C. et al. Mechanochemistry: opportunities for new and cleaner synthesis. *Chemical Society Reviews*. 2012. T. 41. №. 1. С. 413-447.
12. Томина Е.В., Ласточкин Д.А., Мальцев С.А. Синтез нанолуминофоров YPV1-ХО4 спрей-пиролизическим и микроволновым методами. Конденсированные среды и межфазные границы. 2020. Т. 22. №. 4. С. 496-503.
13. Арзманова А.Б., Данилова Е.А., Чижевская С.В., Жуков А.В. Получение нанопорошков оксидов иттрия и европия термическим разложением прекурсоров. *Успехи в химии и химической технологии*. 2016. Т. 30. №. 6 (175). С. 31-32.
14. Карпанин О.В., Метальников А.М., Пивкин А.Ю., Соловьев В.А. Получение наноструктурированных тонких пленок методом спрей пиролиза аэрозолей. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2011. Т. 2. С. 165-166.
15. Справочник фотолюбителя / Под общ. ред. Е.А. Иофиса и В.Г. Пелля. Москва: Искусство, 1961. 532 с.
- abstracts. Moscow: National Research Center "Kurchatov Institute", 2023. P. 170. EDN SKTFLA.
8. Vasina O. Yu. Sol-gel luminophores based on silicates of elements of the second group. Moscow, 2003. 187 p.
9. Ye S., Xiao F., Pan Y.X., Ma Y.Y., Zhang Q.Y. Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: recent advances in materials, techniques and properties, *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 71 (2010) 1e34, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2010.07.001>.
10. Kantupitim P., Nakauchi D., Kato T. et al. Optical and scintillation characteristics of Tb-doped La₂Si₂O₇ single crystal. *Sens. Mater.* 2023. T. 35. P. 451-458.
11. James S.L., Adams Ch.J., Bolm C. et al. Mechanochemistry: opportunities for new and cleaner synthesis. *Chemical Society Reviews*. 2012. T. 41. N 1. P. 413-447.
12. Tomina E.V., Lastochkin D.A., Maltsev S.A. Synthesis of YPV1-XO₄ nanophosphors by spray-pyrolytic and microwave methods. *Condensed media and interphase boundaries*. 2020. V. 22. N 4. P. 496-503.
13. Arzmanova A.B., Danilova E.A., Chizhevskaya S.V., Zhukov A.V. Production of yttrium and europium oxide nanopowders by thermal decomposition of precursors. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2016. Vol. 30. N 6 (175). P. 31-32.
14. Karpanin O.V., Metalnikov A.M., Pivkin A.Yu., Soloviev V.A. Obtaining nanostructured thin films by spray pyrolysis of aerosols. *Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2011. Vol. 2. P. 165-166.
15. Handbook of an amateur photographer / Under the general editorship of E.A. Iofis and V.G. Pell. Moscow: Iskustvo, 1961. 532 p.

Поступила в редакцию(Received) 18.03.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 21.04.23