

АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, А ТАКЖЕ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ЛЮМИНОФОРОВ $YAG : Ce^{3+}$ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

© 2025 г. С. М. Зуев^{1,2*}, Д. А. Прохоров^{1,2}

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

²Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт “НАМИ”, Москва, Россия

*E-mail: sergei_zuev@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.2024

После доработки 14.10.2024

Принята в печать 21.10.2024

В статье проведен анализ физико-химических и оптических характеристик, а также адгезионных свойств двух люминофоров на основе иттриевого алюминиевого граната, легированного церием. Целью исследования было определение возможности применения этих люминофоров в лазерных осветительных устройствах. Для этого были проанализированы спектры и цветовые диаграммы при воздействии на люминофоры лазерного излучения с разными величинами мощности и тока. Результаты показали, что оба рассмотренных люминофора обладают высокой светоотдачей при подаче на них тока. Однако при эксплуатации люминофорных систем спустя шесть месяцев после их изготовления они проявили различия в адгезионных свойствах. Была также разработана блок-схема устройства, позволяющего анализировать физико-химические параметры лазерных люминофорных систем при воздействии на них лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 405\text{--}450$ нм. С помощью этого устройства были получены данные о характеристиках люминофоров при разных значениях тока, что дает возможность более точно регулировать процессы их деградации. Исследование показало, что оба рассмотренных люминофора могут быть использованы в лазерных осветительных устройствах, однако один из образцов люминофора является более стабильным и долговечным материалом благодаря лучшей адгезии с подложкой. Предложенные результаты могут быть полезны при разработке новых лазерных средств освещения.

Ключевые слова: люминофор, иттрий-алюминиевый гранат, легирование церием, оптико-электронные приборы и системы, спектр люминесценции, диаграмма цветности, адгезия.

DOI: 10.31857/S0207401X25030012

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лазерные осветительные устройства начинают широко применяться в различных областях, включая освещение помещений, подсветку экранов и дисплеев, а также в медицинских целях [1]. Однако для максимальной эффективности и стабильности работы этих устройств необходимо использовать высококачественные люминофоры – материалы, обладающие способностью преобразовывать энергию лазерного излучения в видимый свет [2]. Среди люминофоров наиболее перспективными являются материалы на основе иттрий-алюминиевого граната, легированного церием ($YAG : Ce^{3+}$). Они обладают высокой стабильностью, интенсивностью и широким спектром испускания света, что делает их идеальным выбором для использования

в лазерных осветительных устройствах [3, 4]. Однако для эффективного применения данных материалов необходимо провести комплексный физико-химический и оптический анализ, который позволит более глубоко понять и в дальнейшем улучшить их характеристики. Такой анализ даст возможность выявить структурные и оптические свойства $YAG : Ce^{3+}$ в различных условиях и определить особенности их взаимодействия с лазерным излучением, что в конечном итоге приведет к улучшению эффективности лазерных осветительных устройств [5, 6].

В данной статье проведен комплексный анализ физико-химических и оптических характеристик $YAG : Ce^{3+}$, что дает более подробное представление об их свойствах и возможностях применения в лазерных осветительных устройствах. Получен-

ные результаты могут быть использованы для разработки более эффективных и надежных лазерных осветительных устройств, что имеет большое практическое значение для различных областей, в которых используется данная технология. Таким образом, данная статья является актуальной и важной для развития науки и технологии осветительных устройств на основе $YAG:Ce^{3+}$.

Рассмотрим результаты химического анализа образцов люминофорных порошков. В ходе работы были исследованы два сорта люминофоров российского производства от разных производителей: ЛСИД-560 и ФЛС-540, которые могут применяться для лазерных осветительных систем. Основой данных люминофоров является иттрий-алюминиевый гранат легированный церием ($YAG:Ce^{3+}$). Его отличительной особенностью является то, что у него имеется область возбуждения фотолюминесценции с максимумом при длине волны $\lambda = 460$ нм [7]. Эти люминофоры преобразуют излучение лазера с $\lambda = 405-450$ нм в видимый свет. В качестве наполнителей использовались стекловидный лак на основе акриловой смолы, смеси органических растворителей и функциональных добавок.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приведем перечень оборудования и методов, использованных в ходе проведения исследования.

– Атомно-эмиссионный спектрометр параллельного действия с индуктивно связанной плазмой ICPE-9820 производства компании Shimadzu (Japan), который используется для определения содержания различных элементов в образцах люминофоров $YAG:Ce^{3+}$. Используя этот прибор, можно провести точный качественный и количественный анализ химического состава образцов. Благодаря этому можно получить информацию о количестве основных и примесных элементов в материале, что позволит оценить его качество и провести сравнительный анализ с другими образцами.

– Спектрометр энергий рентгеновского излучения СЕР-01 производства ООО “Элватех” (Украина), который используется для измерения и анализа спектров рентгеновского излучения, в том числе полученного от люминофоров $YAG:Ce^{3+}$. С помощью этого прибора можно изучать спектральный состав излучения различных

веществ, определять наличие и концентрацию определенных элементов в образцах и оценивать их физико-химические свойства [8].

– Атомно-эмиссионная спектрометрия – метод, основанный на регистрации испускания (эмиссии) атомов и ионов определяемого элемента при высокотемпературном нагреве (при температуре 3500–8000 °С). Последующий переход атомов из возбужденного состояния в нормальное (рекомбинация) сопровождается излучением с определенными длинами волн. Спектр излучения для атомов каждого элемента строго индивидуален, а интенсивность излучения с характеристической длиной волны зависит от концентрации элемента [9]. Элементы, содержащиеся в пробе, идентифицируют по набору линий (на основании частот или длин волн) испускаемого электромагнитного излучения. Количественный анализ основан на измерении интенсивности спектральных линий элементов. Это позволяет идентифицировать атомы, имея библиотеку спектров, и по интенсивности излучения и предварительно полученным с помощью стандартных растворов калибровочным зависимостям проводить количественное определение содержания элементов в пробе [10].

– Рентгеноспектральный микроанализ. Пучок электронов диаметром около 0.5 мкм, с энергией 5–50 кэВ падает на поверхность образца и, взаимодействуя с его атомами, генерирует характеристическое рентгеновское излучение [11]. Измеряя длину волны и интенсивность этого излучения, можно определить, какие элементы присутствуют в образце, их распределение с локальностью около 1 мкм и их концентрацию.

В ходе работы было проведено определение химического состава образца люминофора (идентификация компонентов) и сделан количественный анализ содержания алюминия, иттрия, церия.

Как известно, люминофор – вещество, способное преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение (люминесцировать). По химической природе люминофоры разделяются на неорганические (фосфоры), большинство из которых относится к кристаллофосфорам, и органические (органолуминофоры). Свечение неорганических люминофоров (кристаллофосфоров) обусловлено в большинстве случаев присутствием посторонних катионов, содержащихся в

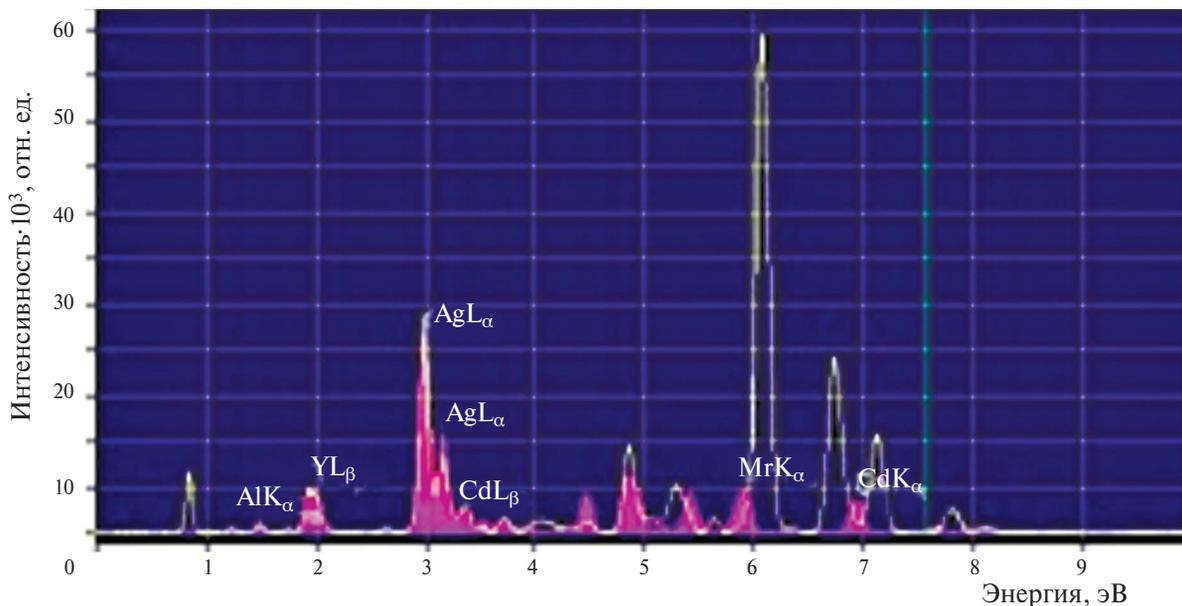


Рис. 1. Энергодисперсионный рентгеновский спектр люминофора ЛСИД-560.

малых количествах (от 0.0001% до 2%). Такие примеси (активаторы) обычно являются ионами переходных металлов, например люминесценция сульфида цинка активируется примесью ионов меди [12, 13].

Иттрий-алюминиевый гранат (YAG, $Y_3Al_5O_{12}$) – синтетический кристаллический материал группы гранатов. Это кубическая фаза иттрия алюминия, другими примерами которой являются $YAlO_3$ (YAP) в гексагональной или орторомбической форме, напоминающей перовскит, и моноклинный $Y_4Al_2O_9$ (YAM) [14].

Иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием (III), представляет собой люминофор, или сцинтиллятор в чистом монокристаллическом виде с широким спектром применения. Он излучает желтый свет при воздействии на него синего, ультрафиолетового света или рентгеновских лучей [15].

Образец исследовали методом атомно-эмиссионной спектроскопии с целью определения содержания алюминия, иттрия и церия. Для этого проводили следующую пробоподготовку: 0.0344 г образца растворяли в плавиковой кислоте при кипячении, используя фторопластовую посуду. По мере выпаривания кислоты добавляли новые порции плавиковой кислоты. По прошествии часа кислоту выпаривали досуха [16]. Далее сухой остаток растворяли в 20%-ной соляной кислоте при длительном нагреве. После растворения образца раствор переносили в колбу объемом

Таблица 1. Результаты исследования люминофора ЛСИД-560 на содержание Al, Y, Се в образце

Наименование показателя, мас. %	Результат испытаний
Al	28.947
Y	12.360
Се	3.462

250 мл и доводили до метки 250 мл дистиллированной водой [17].

Элементный анализ образца был выполнен на атомно-эмиссионном спектрометре параллельного действия с индуктивно связанной плазмой ICPE-9820 (Shimadzu, Japan). Образец разбавили бидистиллированной водой, а затем использовали его для измерений без дополнительной пробоподготовки. Результаты анализа люминофора ЛСИД-560 на содержание Al, Y, Се в веществе представлены в табл. 1.

Образец в чистом виде исследовали методом энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Энергодисперсионный рентгеновский спектр образца ЛСИД-560 представлен на рис. 1.

В результате исследований было установлено, что ЛСИД-560 имеет следующий фазовый состав: иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием и содержащий примеси соединений гадолиния, кобальта, хрома, марганца, фосфора, стронция, меди, цинка, циркония, олова и вольфрама,

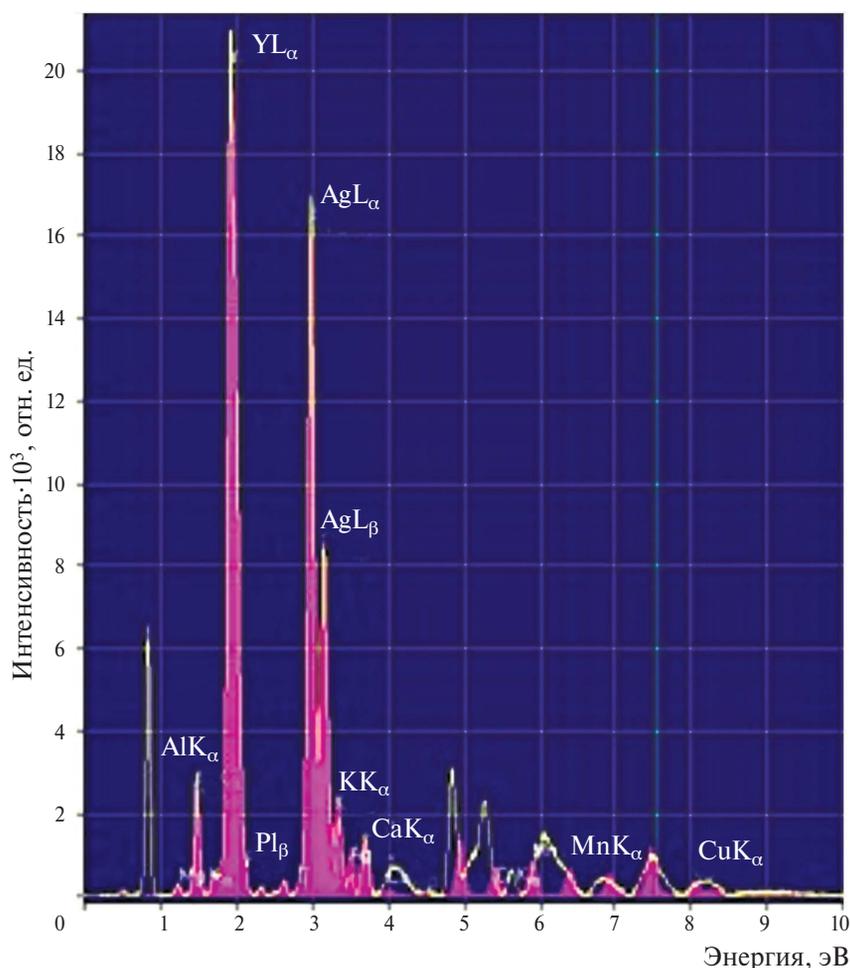


Рис. 2. Энергодисперсионный рентгеновский спектр образца ФЛС-540.

Таблица 2. Результаты исследования люминофора ФЛС-540 на содержание Al, Y, Се в образце

Наименование показателя, мас. %	Результат испытаний
Al	34.029
Y	23.560
Се	1.698

следовые количества соединений кремния, мышьяка, кадмия, кальция и магния.

Результаты анализа люминофора ФЛС-540 на содержание Al, Y, Се в веществе представлены в табл. 2. Образец в чистом виде исследовали методом РСМА. Энергодисперсионный рентгеновский спектр образца ФЛС-540 представлен на рис. 2.

В результате исследований было установлено, что люминофор ФЛС-540 имеет следующий фазовый состав: иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием и содержащий примеси соединений стронция, цинка, хрома, рубидия, олова, вольфрама, следовые количества примесей

соединений серы, марганца, кальция, фосфора, кремния, магния, меди, калия, хлора, циркония, кадмия, сурьмы.

Далее были изучены электрические и тепловые характеристики лазерного излучения при его воздействии на люминофоры. Исследования проводились с использованием установки, подробно описанной в работе [7].

При воздействии лазерным излучением устройства на люминофоры ЛСИД-560 и ФЛС-540 были получены электрические характеристики, приведенные на рис. 3 и 4 соответственно.

Падение напряжения на устройстве и связанное с этим падение электрической мощности (рис. 3, 4) составляли до 15% с последующей стабилизацией на одном уровне. Это учитывалось при дальнейшем анализе и получении численных значений светового потока.

Затем были изучены спектры излучения люминофоров. Для исследования спектров излуче-

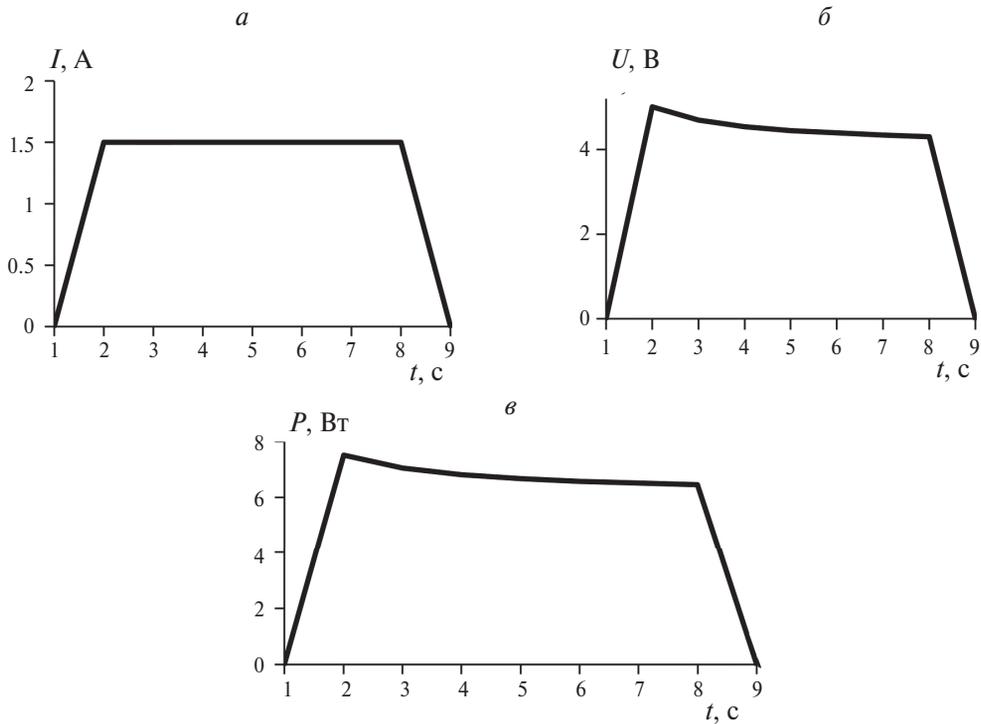


Рис. 3. Кинетические кривые силы тока (а), падения напряжения (б) и электрической мощности (в) при $I = 1.0$ А устройства, позволяющего анализировать физико-химические параметры лазерных люминофорных систем для ЛСИД-560, подаваемая на лазерный диод.

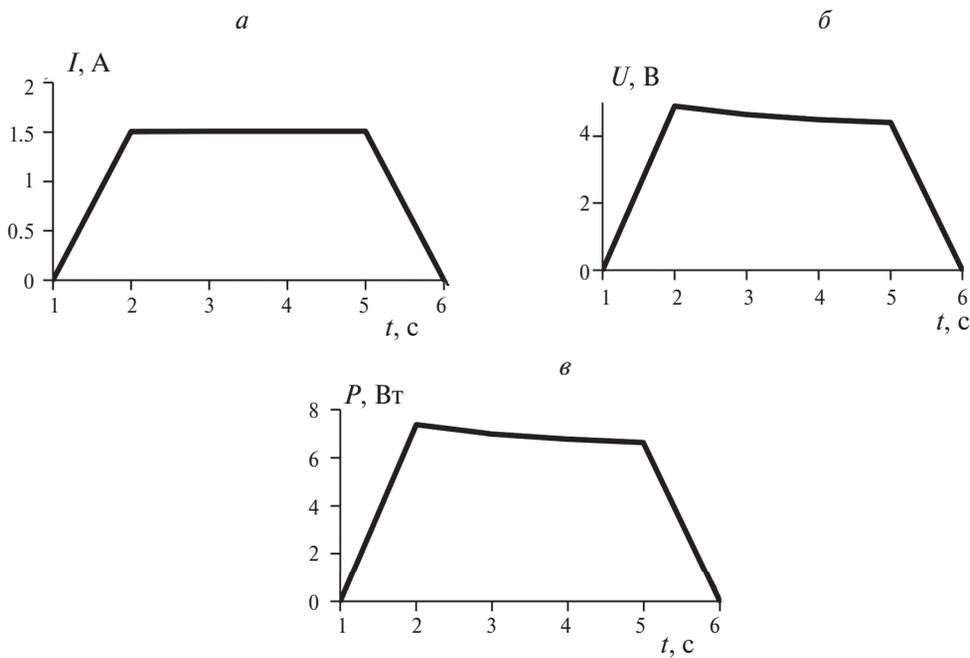


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для ФЛС-540.

ния использовалось специальное устройство — спектрометр модели OHSP-350 производства компании HOPPOCOLOR (China), который используется для определения оптических характеристик люминофоров, таких как спектр поглощения и спектр люминесценции, диаграмма цвет-

ности, которые помогают в анализе их физико-химических характеристик. Эти данные могут быть использованы для дальнейшего улучшения светоизлучающих свойств люминофоров и оптимизации их применения в лазерных осветительных устройствах. Также, зная удельные координаты

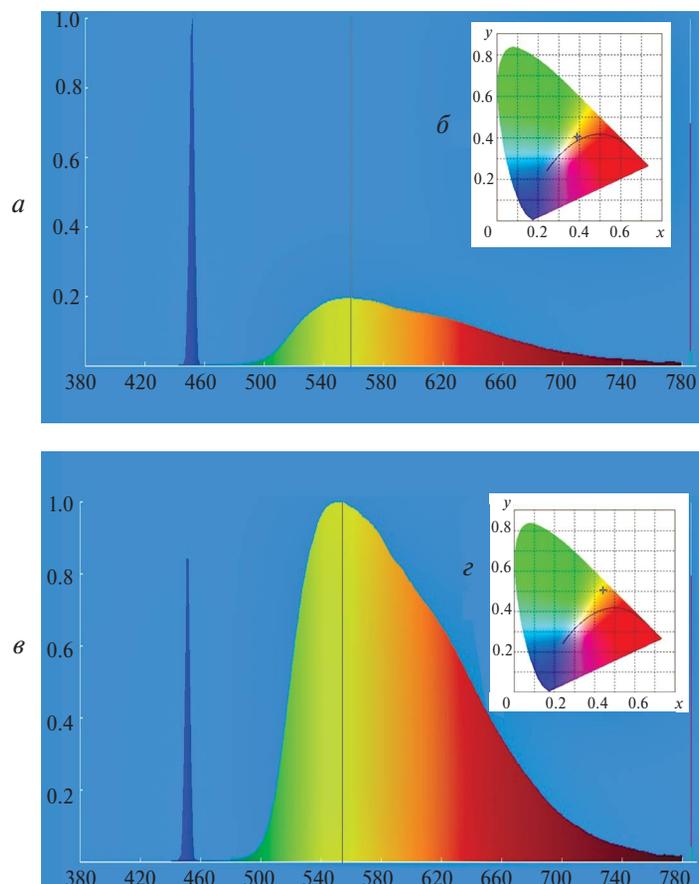


Рис. 5. Спектры люминесценции (a , v) и диаграммы цветности (b , z) люминофоров ЛСИД-560 и ФЛС-540 (v , z) при воздействии на них лазерным излучением с $I = 1.0$ А.

наты, можно рассчитать координаты цвета исследуемого излучения по его спектральному составу без визуального уравнивания цвета человеком.

На рис. 5 представлены спектры люминесценции (a и v) и диаграммы цветности (b и z) люминофоров ЛСИД-560 (a , b) и ФЛС-540 (v , z) при воздействии на них лазерным излучением с $I = 1.0$ А.

Анализ спектров люминесценции люминофоров показал, что спектр излучения находится в видимом диапазоне, и его максимум для ЛСИД-560 приходится на синий спектр излучения ($\lambda = 450$ нм), а для ФЛС-540 – на желтый спектр излучения ($\lambda = 550$ нм). Наличие максимума спектра в синем и УФ-диапазонах длин волн отрицательно влияет на человеческое зрение, однако эту особенность можно нивелировать с развитием технологии лазерных осветительных устройств.

Диаграмма цветности используется для визуализации цветовых свойств световых источников в виде эллиптической или треугольной фигуры на цветовом пространстве КИЭ-1931 (также из-

вестном как CIE XYZ). Эта диаграмма позволяет оценить цветовые характеристики света, такие как температура цвета и цветовой сдвиг.

Для люминофоров ЛСИД-560 и ФЛС-540 диаграммы цветности соответствуют желто-красному спектру излучения. Это означает, что данные люминофторы обладают способностью излучать свет с желтыми и красными длинами волн в видимом спектре. Цветовая точность этих люминофоров может быть оценена по расстоянию до идеального значения на диаграмме цветности, измеренному в единицах цветовой разности. Чем меньше расстояние до идеального значения, тем выше цветовая точность светового источника.

В связи с этим для более точного и яркого представления цветовых характеристик люминофоров оценка их диаграммы цветности может быть необходимой задачей. Это может помочь в выборе правильных люминофоров для конкретных приложений, таких как индикаторы, подсветки или маркеры.

Таблица 3. Зависимость светового потока от тока, подаваемого на лазерный диод для ЛСИД-560

Параметр	Значение параметра					
Ток, подаваемый на лазерный диод, А	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
Световой поток, лк	147.9	569.85	759.07	968.37	1236.81	1318.63

Таблица 4. Зависимость светового потока от тока, подаваемого на лазерный диод для ФЛС-540

Параметр	Значение параметра					
Ток, подаваемый на лазерный диод, А	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
Световой поток, лк	239.36	1257.01	2298.05	3102.42	3235.74	3689.63

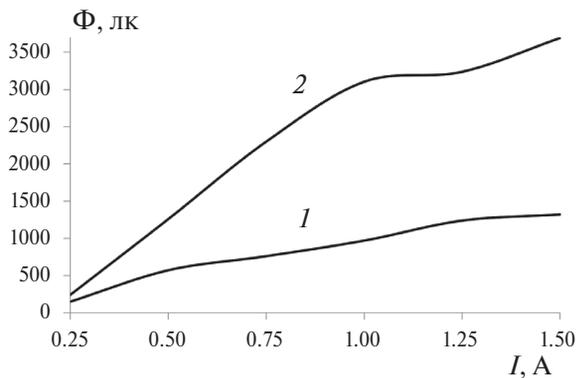


Рис. 6. Зависимость светового потока (Ф) от тока, подаваемого на лазерный диод, для люминофоров ЛСИД-560 (1) и ФЛС-540 (2).

Известно, что идеальный базовый спектр лазерного светильника должен быть близок к спектру излучения солнца в видимом диапазоне длин волн, так как человеческий глаз приспособлен к похожему спектру. Следовательно, люминофор ФЛС-540 лучше подойдет для использования в твердотельной технологии лазерного освещения.

Зависимость светового потока от тока, подаваемого на лазерный диод для ЛСИД-560, представлены в табл. 3. Аналогичная зависимость для ФЛС-540 представлена в табл. 4 и на рис. 6.

Дегградация люминофорной системы для лазерных осветительных систем [18] может быть двух типов:

- дегградация, связанная с воздействием лазерного излучения на вещество;
- дегградация, связанная с адгезией люминофорной системы к подложке, в качестве которой могут выступать стекло, пластик, металл, керамика.

Дегградация люминофорных систем для лазерных осветительных устройств, связанная с воздействием лазерного излучения на вещество, — это

процесс изменения характеристик люминесцентного материала под воздействием высокой интенсивности света (в основном лазерного), и в данной работе детально не рассматривается.

Временная дегградация люминофорных систем для лазерных осветительных устройств, связанная с адгезией люминофорной системы к подложке, обусловлена неустойчивостью люминофорной пленки на подложке. При эксплуатации устройства происходит воздействие перепадов температуры и механического напряжения на пленку, которое приводит к снижению адгезионных сил между люминофором и подложкой. В результате частицы люминофора могут отслаиваться от подложки, что приводит к ухудшению светоотдачи устройства. Этот процесс происходит постепенно и может быть замечен после длительного периода эксплуатации устройства. Чтобы избежать временной дегградации, производители стараются подобрать оптимальный состав и толщину пленки, а также использовать специальные методы нанесения люминофора на подложку, например путем ионного облучения или ультразвуковой обработки на наноразмере. Также важно соблюдать правильные условия эксплуатации устройства, чтобы не допустить повышенной температуры и механических нагрузок на пленку [8]. В ходе работы типы люминофорных систем были исследованы на предмет временной дегградации (рис. 7). Система люминофор — стекловидный лак смешивалась в пропорции 1 : 4 и далее наносилась на стеклянную подложку простым методом наливки и растекания по подложке.

Проведенные исследования образцов люминофорных пленок, представляющих собой смесь люминофора и стекловидного лака, показали, что люминофор ЛСИД-560 претерпевает адгезионную дегградацию к стеклянной подложке начиная с четырех месяцев эксплуатации. А образец, представляющий собой смесь ФЛС-540 и стекловид-

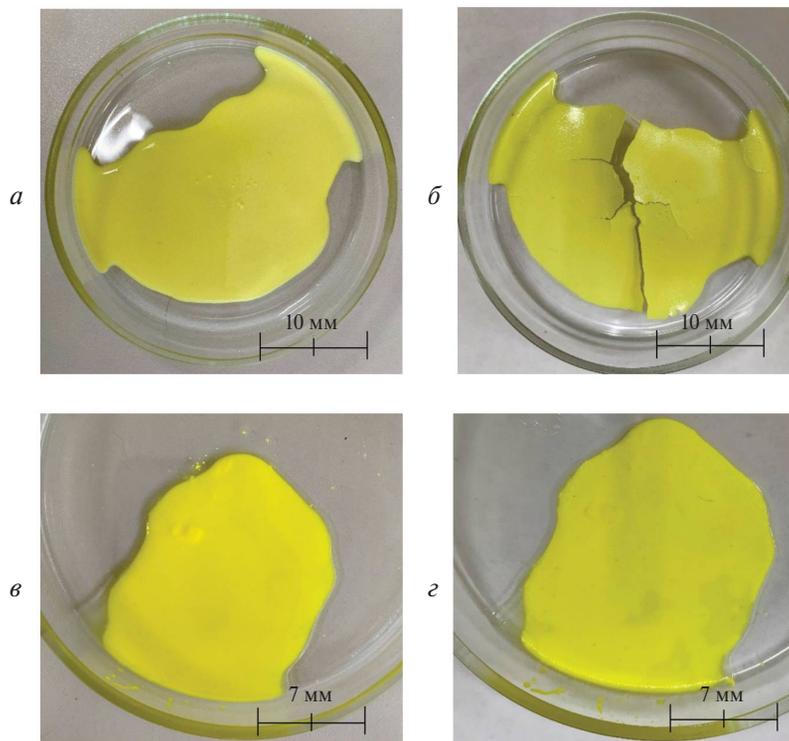


Рис. 7. Общий вид люминофорной пленки ЛСИД-560 при ее изготовлении (*a*) и ее временная деградация по прошествии шести месяцев с момента изготовления (*б*), связанная с ее адгезией и химическими свойствами; общий вид люминофорной пленки ФЛС-540 при ее изготовлении (*в*) и по прошествии шести месяцев с момента изготовления (*г*).

ного лака, не претерпевает адгезионной деградации с сохранением физико-химических характеристик по прошествии шести месяцев с момента ее изготовления. Очевидно, что адгезионная стойкость данных систем связана со свойствами люминофора.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования двух люминофоров показали преимущество образца ФЛС-540 по сравнению с образцом ЛСИД-560 по светотехническим и адгезионным (для стеклянной подложки) характеристикам. По мнению авторов это связано с нижеследующими факторами.

1. Результаты исследования показали, что в составе люминофора ФЛС-540 присутствует большее количество активатора в виде ионов иттрия по сравнению с ЛСИД-560. Это влияет на увеличение светового потока при подаче тока на лазерный диод, так как именно ионы иттрия отвечают за эффективность реакции люминесценции [19]. Кроме того, в составе ФЛС-540 присутствуют меньшие концентрации примесей, таких как гидроксогаллаты, которые содержат в своей струк-

туре атомы Ga и кислорода, а также другие элементы, например La или церий Ce. Также в данном образце наблюдается значительное количество марганцевой кислоты (порядка 0.28 мас.%), что может способствовать более эффективной активации световых центров и увеличить световой поток. Марганцевая кислота лилового цвета или бурых оттенков используется в качестве добавки в люминофоры для улучшения светопередачи и эффекта люминесценции. Она также способна уменьшить рассеивание света и повысить яркость люминофора. Однако чрезмерное количество марганцевой кислоты может привести к уменьшению светового потока и ухудшить качество освещения.

2. Как видно из результатов исследований химического состава люминофоров ЛСИД-560 и ФЛС-540, у последнего содержание алюминия выше, чем у ЛСИД-560. Алюминий является легирующим элементом, который улучшает адгезию материала к подложке, поэтому у ФЛС-540 адгезия к стеклянной подложке оказалась лучше. При контакте алюминия и стекла в межмолекулярном пространстве образуются слабые взаимосвязи, такие как ван-дер-ваальсовы силы и диполь-ди-

польные взаимодействия. При контакте алюминия и стекла в межмолекулярном пространстве образуются слабые взаимодействия, такие как ван-дер-ваальсовы силы и диполь-дипольные взаимодействия. Эти силы приводят к образованию химических связей между атомами алюминия и кислорода на поверхности стекла [20–23].

Ван-дер-ваальсовы [24] силы для итрий-алюминиевого граната, легированного церием (YAG:Ce), и стекла могут быть описаны следующими формулами:

$$F = (C_1/r^6)A_1 + (C_2/r^6)A_2, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты пропорциональности для каждого взаимодействия, A_1 и A_2 – коэффициенты поляризуемости для каждого материала [25], r – расстояние между поверхностными слоями.

Диполь-дипольные взаимодействия для YAG:Ce³⁺ и стекла могут быть описаны формулой вида

$$F = (\mu_1 \cdot \mu_2)/r^3, \quad (2)$$

где μ_1 и μ_2 – дипольные моменты для каждого материала.

В формулах (1) и (2) коэффициенты C_1 , C_2 , A_1 , A_2 , μ_1 и μ_2 зависят от структуры и химического состава каждого из материалов. Чем ближе расстояние между поверхностными слоями, тем большие силы будут действовать и тем сильнее будет адгезия между алюминием и стеклом.

Кроме того, у люминофора ФЛС-540 присутствуют следовые количества соединений серы, марганца, кальция, фосфора, кремния, магния, меди, калия, хлора, циркония, кадмия, сурьмы. Вероятно, один или несколько из этих элементов также влияют на адгезию к подложке, улучшая ее. Однако точная зависимость между концентрацией данных элементов и адгезией требует дополнительных исследований.

3. Из анализа спектров люминесценции (рис. 6) можно сделать вывод, что в спектре излучения люминофора ФЛС-540 имеется максимум в желтом диапазоне длины волны, который является более благоприятным для человеческого зрения по сравнению с максимумом спектра излучения в синем диапазоне в случае ЛСИД-560. Хотя спектр ЛСИД-560 совпадает со спектром светодиодов, которые реализуются на мировом рынке на настоящий момент. Таким образом, для освеще-

тельных лазерных устройств люминофор ФЛС-540 будет предпочтительнее, так как не будет оказывать негативного влияния на зрительную функцию.

Исследование выполнено при поддержке грантом Российского научного фонда № 23-29-00079; <https://rscf.ru/project/23-29-00079/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jung H.K., Kim C.H., Hong A-Ra et al. // Ceram. Intern. 2019. V. 45. № 8. P. 9846.
2. Upasani M., Butey B., Moharil S.V. // Optik. 2019. 2016. V. 127. № 4. P. 2004.
3. Mishra N.K., Upadhyay M.M., Kumar S. et al. // Spectrochim. Acta, Part A. 2022. V. 282. P. 121664. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121664>
4. Uspenskaya Y.A., Edinach E.V., Gurin A.S. et al. // J. Lumin. 2022. V.251. P. 119166.
5. Liu G., Wang B., Li J. et al. // Physica B. 2021. V. 603. P. 412775.
6. Pier T., Hopster J., Jüstel T. // J. Lumin. 2024. V. 266. P. 120315.
7. Zuev S.M., Kretushev A.V. // Opt. Spectrosc. 2023. V. 131. № 3. P. 346.
8. Michail C., Ninos K., Kalyvas N. et al. // Microelectron. Reliab. 2020. V.109. P. 113658.
9. Tarala V.A., Kravtsov A.A., Malyavin F.F. et al. // Opt. Mater. 2023. V. 143. P.114231.
10. Peter S., Patel A., Kitai A. // J. Lumin. 2019. V. 211. P. 82.
11. Muresan L.E., Ayvacikli M., Garcia Guinea J. et al. // Opt. Mater. 2017. V. 74. P. 150.
12. Chen Y.C., Nien Y.-T. // J. Eur. Ceram. Soc. 2017. V. 37. № 1. P. 223.
13. Katelnikovas A., Sakirzanovas S., Dutczak D. et al. // J. Lumin. 2013. V. 136. P. 17.
14. Almessiere M.A., Ahmed N.M., Massoudi I. et al. // Optik. 2018. V. 158. P. 152.
15. You Z., Yue K., Zhang J. et al. // Ibid. 2019. V. 176. P. 241.
16. Nien Y.-T., Chen Y.-C., Chiu I.-C. // J. Alloys Compd. 2019. V. 797. P. 110.
17. Choi Y.-K., Halappa P., Shivakumara C. et al. // Optik. 2019. V. 181. P. 1113.
18. Chuluunbaatar Z., Wang C., Kim E.S. et al. // Intern. J. Therm. Sci. 2014. V. 86. P. 307.
19. Zhao W., Xie B., Peng Y. et al. // Opt. Laser Technol. 2023. V. 157. P. 108689.
20. Li K., Shen C. // Optik. 2012. V. 123. №7. P. 621.
21. Razumov W.F. // Russ. J. Phys. Chem. 2023. V. 17. № 1. P. 36. <https://doi.org/10.1134/s199079312301027x>
22. Фионов А.С., Колесов В.В., Фионова В.А. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 11. С. 79. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2311002X>

23. *Ветчинкин А.С., Уманский С.Я., Чайкина Ю.А., Шушин А.И.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 9. С. 72.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22090102>
24. *Петинов В.И., Тимин В.М., Боженко К.В., Утенышев А.Н.* // Хим. физика. 2024. Т. 43. № 4. С. 3.
- <https://doi.org/10.31857/S0207401X24040015>
25. *Лобанов А.В., Апашева Л.М., Смурова Л.А. и др.* // Хим. физика. 2024. Т. 43. № 4. С. 74.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X24040095>

ANALYSIS OF THE PHYSICO-CHEMICAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS, AS WELL AS THE ADHESION PROPERTIES OF YAG:Ce³⁺ PHOSPHORS FOR LASER ILLUMINATION DEVICES

S. M. Zuev^{1,2*}, D. A. Prokhorov^{1,2}

¹MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

²Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute, Moscow, Russia

*E-mail: sergei_zuev@mail.ru

The present scientific article encompasses an analysis of the physicochemical and optical characteristics, as well as adhesion properties of two luminescent materials based on yttrium aluminum garnet, doped with cerium. The aim of the study was to determine the potential usage of these luminescent materials in laser lighting devices. To achieve this, the luminescence spectrum and color diagrams were analyzed when the luminescent materials were subjected to laser radiation with various power and current values. The results revealed that both examined luminescent materials possess high luminous efficiency when current is applied. However, after six months of operation, the luminescent systems exhibited differences in their adhesion properties. Additionally, the study produced a block diagram of a device designed to analyze the physicochemical parameters of laser luminescent systems under the influence of laser radiation with $\lambda = 405\text{--}450$ nm. With the aid of this device, data on the characteristics of the luminescent materials under different current values were obtained, providing a more precise control over their degradation processes. The investigation demonstrated that both examined luminescent materials can be utilized in laser lighting devices, but one of the luminescent material samples proved to be a more stable and durable material due to its better adhesion with the substrate. The proposed results can be beneficial in the development of new laser lighting tools.

Keywords: phosphor; yttrium aluminum garnet doped with cerium; optical-electronic devices and systems; EDS; luminescence spectrum; color chart; adhesion.

REFERENCES

1. H.K. Jung, C.H. Kim, A-Ra Hong et al. *Ceram. Int.*, **45** (8), 9846 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.02.023>
2. M. Upasani, B. Butey, S.V. Moharil. *Optik*, **127** (4), 2004 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.070>
3. N.K. Mishra, M.M. Upadhyay, S. Kumar et al. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **282**, 121664, (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121664>
4. Y.A. Uspenskaya, E.V. Edinach, A.S. Gurin et al. *J. Lumin.*, **251**, 119166, (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119166>
5. G. Liu, B. Wang, J. Li et al. *Phys. B Condens. Matter*, **603**, 412775, (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412775>
6. T. Pier, J. Hopster, T. Jüstel. *J. Lumin.*, **266**, 120315, (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.120315>
7. S.M. Zuev, A.V. Kretushev. *Opt. Spectrosc.*, **131**(3), 346, (2023).
<https://doi.org/10.61011/EOS.2023.03.56185.4616-22>
8. C. Michail, K. Ninos, N. Kalyvas et al. *Microelectron. Reliab.* **109**, 113658, (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113658>
9. V.A. Tarala, A.A. Kravtsov, F.F. Malyavin et al. *Opt. Mater.*, **143**, 114231, (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114231>
10. S. Peter, A. Patel, A. Kitai. *J. Lumin.*, **211**, 82 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.03.024>
11. L.E. Muresan, M. Ayvacikli, J. Garcia Guinea et al. *Opt. Mater.*, **74**, 150, (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.044>
12. Y.C. Chen, Y.-T. Nien, J. Eur. *Ceram. Soc.*, **37**(1), 223 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.07.032>
13. A. Katelnikovas, S. Sakirzanovas, D. Dutczak et al. *J. Lumin.*, **136**, 17 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.11.012>
14. M.A. Almessiere, N.M. Ahmed, I. Massoudi et al. *Optik*, **158**, 152 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.12.031>
15. Z. You, K. Yue, J. Zhang, etc., *Optik*, **176**, 241 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.076>
16. Y.-T. Nien, Y.-C. Chen, I.-C. Chiu., *J. Alloys Compd.*, **797**, 110 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.089>
17. Y.-K. Choi, P. Halappa, C. Shivakumara et al. *Optik*, **181**, 1113 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.213>
18. Z. Chuluunbaatar, C. Wang, E.S. Kim et al. *Int. J. Therm. Sci.*, **86**, 307 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.07.013>
19. W. Zhao, B. Xie, Y. Peng et al. *Opt. Laser Technol.*, **157**, 108689, (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108689>
20. K. Li, C. Shen. *Optik*, **123**(7), 621 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.06.005>
21. W.F. Razumov. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **17**(1), 36, (2023).
<https://doi.org/10.1134/s199079312301027x>

22. A.S. Fionov, V.V. Kolesov, V.A. Fionova et al. *Chem. Phys.*, **17(6)**, 1384, (2023).
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2311002X>
23. A.S. Vetchinkin, S.Ya. Umansky, Yu.A. Chaykina, A.I. Shushin. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **16(5)**, 945, (2022).
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22090102>
24. V.I. Petinov, V.M. Timin, K.V. Bozhenko, A.N. Utenyshev. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **18(2)**, 365, (2024).
<https://doi.org/10.31857/S0207401X24040015>
25. A.V. Lobanov, L.M. Apasheva, L.A. Smurova et al. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **18(2)**, 516, (2024).
<https://doi.org/10.31857/S0207401X24040095>