

СВЕТОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.11)

УДК 629.37

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-146-155

К анализу различных типов люминесценции для оптимизации характеристик люминофорных осветительных устройств

С.М. Зуев

Описаны назначение, область применения, основные параметры осветительных систем с применением люминофора. Представлена технология получения люминофоров. Даны оценка их энергетического выхода и инерционности. Приведены данные о световой отдаче светодиода и лазерного осветительного устройства. Обоснована необходимость исследования различного типа видов люминесценции для оптимизации характеристик люминофорных осветительных устройств. Определены достоинства и недостатки люминофорных светодиодов. Рассмотрен принцип действия активаторов для люминофоров. Даны спектры излучения и поглощения светодиода, изготовленного по RGB-технологии, спектр светодиода, выполненного по люминесцентной технологии, а также лазерного осветительного устройства с люминофорным излучателем. Описан технологический процесс изготовления люминофоров. Показано, что люминофоры разного состава обеспечивают люминесценцию в различных областях спектра, а для создания источников «белого» света, спектр которого максимально приближен к спектру солнечного света, необходимо использовать фотолюминофоры на основе галофосфатов кальция, активированных ионами Mn, Sb.

Ключевые слова: люминофор, энергоэффективность, спектры излучения и поглощения, осветительное устройство, оптико-электронные приборы и системы.

Для цитирования: Зуев С.М. К анализу различных типов люминесценции для оптимизации характеристик люминофорных осветительных устройств // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 146—155. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-146-155.

On Analyzing Various Types of Luminescence for Optimizing the Characteristics of Phosphor-enhanced Lighting Devices

S.M. Zuev

The article describes the purpose, scope, and main parameters of lighting systems using phosphor. The technology for obtaining phosphors is described. Their energy output and inertia are estimated. The data on the light output of the LED and the laser lighting device are given. The necessity of studying various types of luminescence to optimize the characteristics of phosphor-enhanced lighting devices is substantiated. The advantages and disadvantages of phosphor LEDs are defined. The operation principle of activators for phosphors is considered. The emission and absorption spectra of an LED made using RGB technology, the spectrum of an LED made using luminescent technology, and a laser lighting device with a phosphor emitter are given. The technological process for manufacturing phosphors is described. It is shown that phosphors of different compositions provide luminescence in different regions of the spectrum. For development of “white” light sources, the spectrum of which is maximally close to the sunlight spectrum, it is necessary to use photophosphors based on calcium halophosphates activated with Mn and Sb ions.

Key words: phosphor, energy efficiency, emission and absorption spectra, lighting device, optoelectronic devices and systems.

For citation: Zuev S.M. On Analyzing Various Types of Luminescence for Optimizing the Characteristics of Phosphor-enhanced Lighting Devices. Bulletin of MPEI. 2023;5:146—155. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-146-155.

Введение

В течение последних ста лет в области светотехники появились новые технологии, схемы, конструкции и идеи [1]. Начиная с разрядных, люминесцентных, светодиодных и, наконец, лазерных источников света, применение люминофоров позволяет создавать освети-

тельные устройства с необычными характеристиками и конструкцией [2]. В связи с этим, цель работы — исследование и описание физико-химических характеристик люминофорных систем, которые могут быть использованы в современных осветительных устройствах, а также технологических процессов их получения.

Люминофорами называют вещества, способные излучать свет под действием различного рода возбуждений. Они могут быть в газообразном, жидком или твердом состоянии [3]. В газообразном состоянии почти все вещества, а также пары веществ, способны люминесцировать и давать характерные линейные спектры излучения, лежащие преимущественно в видимой и ультрафиолетовой области спектра [4]. Из жидких веществ высокую интенсивность люминесценции имеют растворы многих органических соединений, красителей, ароматических соединений типа бензола, нафтлина, антрацена и т. д.

Твердые люминесцентные вещества составляют самую многочисленную группу веществ, используемых для получения люминесцентного излучения.

Выделяют основные характеристики люминофоров: энергетический и квантовый выходы, спектры возбуждения и излучения, инерционность, стабильность, вакуумные свойства [5, 6]. Отношение энергии люминесценции к поглощенной энергии возбуждения называют энергетическим выходом. Ввиду неизбежных потерь энергетический выход всегда меньше единицы (рис. 1).

Спектр возбуждения определяется диапазоном длин волн, поглощаемых люминофором и вызывающих его свечение, а спектр излучения — диапазоном длин волн, излучаемых люминофором. Спектральным составом излучения характеризуется цвет свечения люминофора [7].

Под инерционностью люминофора подразумевают время, в течение которого он приобретает нормальную (100% от номинальной яркости для данного типа люминофора при заданных параметрах мощности источника возбуждения) яркость после начала возбуждения. Стабильность люминофора выражается в сохранении им своих основных светотехнических свойств на заданном уровне в течение определенного времени [8].

Вакуумные свойства люминофора характеризуют возможность его использования внутри вакуумной оболочки. Его стоимость имеет немаловажное значение в связи со значительным ростом их производства.

Первые полупроводниковые излучатели света для промышленного использования были получены в 1962 г. Н. Холоньяком и давали красный свет [9]. В начале 1970-х гг. появились светодиоды желтого и зеленого цветов свечения, однако световой выход этих, в то время еще мало эффективных, устройств к 1990 г. достиг уровня в 1 люмен на 1 ватт. В 1993 г. С. Накамура — инженер компании Nichia (Япония) создал первый синий светодиод высокой яркости. Тогда почти сразу появились светодиодные *RGB*-устройства, поскольку синий, красный и зеленый цвета позволяли получить любой цвет, в том числе и белый [10]. Белые люминофорные светодиоды появились только в 1996 г. [11]. Технология быстро развивалась, и к 2005 г. световая отдача светодиодов, изготовленных как по *RGB*-, т. е. трехцветной, так и по люминесцентной технологии достигла 100 Лм/Вт и более. Появились светодиоды с различными оттенками свечения. Качество света таких устройств конкурировало с лампами накаливания и традиционными люминесцентными лампами [12]. Светодиодные осветительные устройства появились в быту, уличном освещении, на автомобилях, в городском световом оформлении, светофорах и других информационных устройствах, а в настоящее время актуальны конструкции светоизлучающих модулей на лазерных диодах, пример одной из которых представлен на рис. 2.

Для того чтобы определить, какие светодиодные устройства более эффективны, рассмотрим их более подробно. В *RGB*-светоустройствах белый свет может быть создан путем смешивания излучений светодиодов различного цвета. Наиболее распространена трехроматическая конструкция из красного (*R*), зеленого

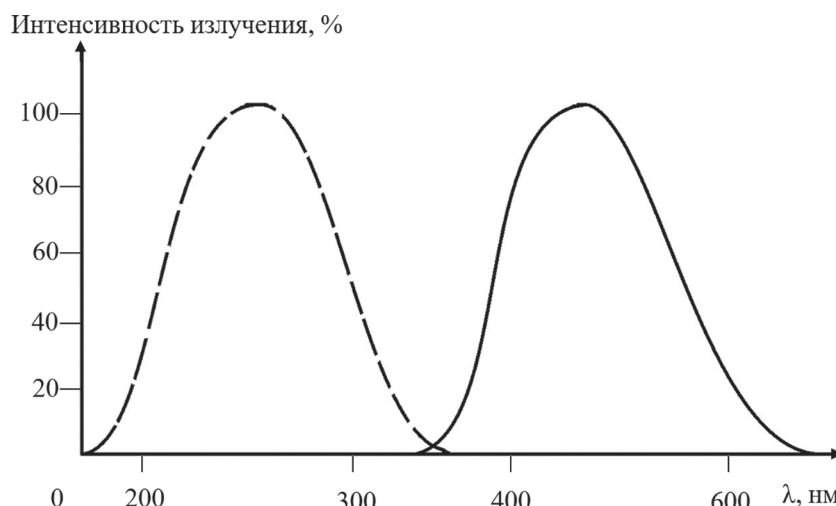
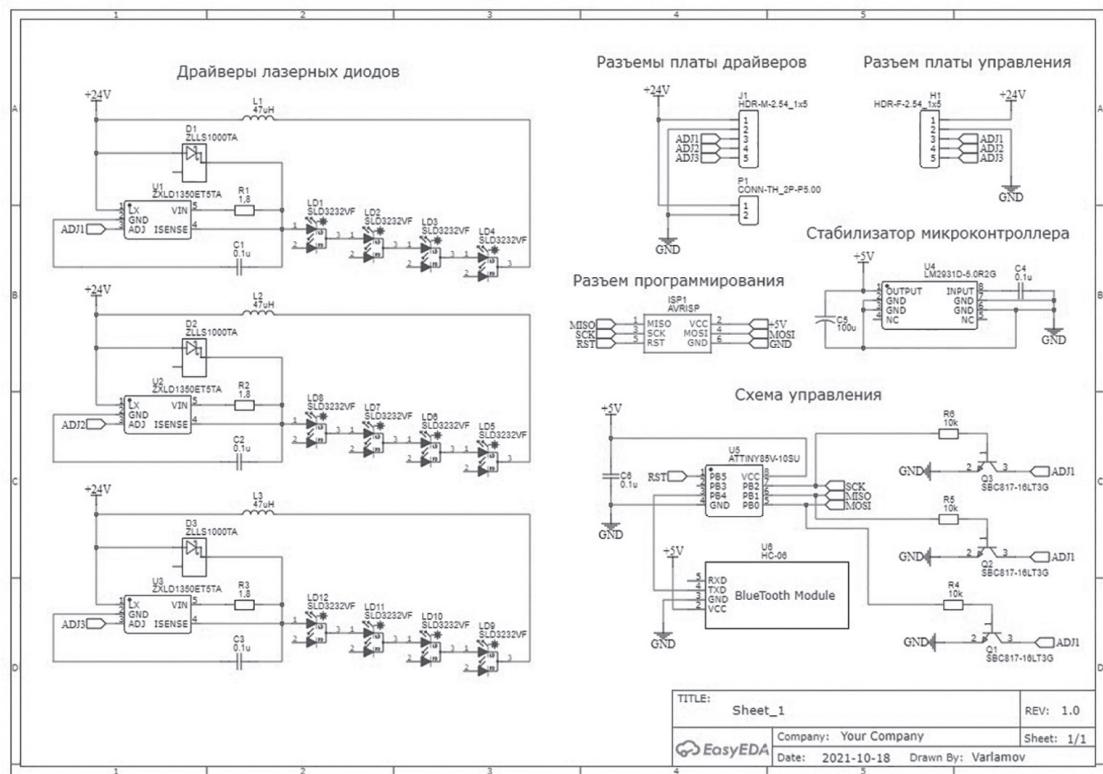


Рис. 1. Спектры излучения и поглощения



a



б

Рис. 2. Вид (а) и принципиальная схема (б) светоизлучающего модуля с 12-ю лазерными диодами:

1 — люминофорный излучатель; 2 — драйвер

(G) и синего (B) источников, хотя встречаются би- и тетрахроматические варианты [13].

Как правило, многоцветный светодиод имеет один законченный корпус, аналогичный одноцветному светодиоду. Светодиодные чипы располагаются рядом друг с другом и используют одну общую линзу и отражатель. Чипы обладают конечным размером и собственными диаметрами направленности, и такие светодиоды имеют чаще всего неравномерные угловые цветовые характеристики. Кроме того, для получения правильного соотношения цветов зачастую недостаточно установить расчетный ток, поскольку световая отдача каждого типа неизвестна заранее и подвержена изменениям в процессе работы. Для установки нуж-

ных оттенков *RGB*-светильники иногда снабжают специальными регулирующими устройствами [14].

Спектр *RGB*-светодиода определяется спектром составляющих его полупроводниковых излучателей и имеет ярко выраженную линейчатую форму (рис. 3).

Такой спектр сильно отличается от солнечного света и, следовательно, индекс цветопередачи таких диодов невысок. *RGB*-светодиоды позволяют легко и в широких пределах управлять цветом свечения путем изменения тока каждого светодиода, регулировать цветовой тон излучаемого ими белого света прямо в процессе работы – вплоть до получения отдельных самостоятельных цветов.

Многоцветные светодиоды имеют зависимость световой отдачи и цвета от температуры за счет различных

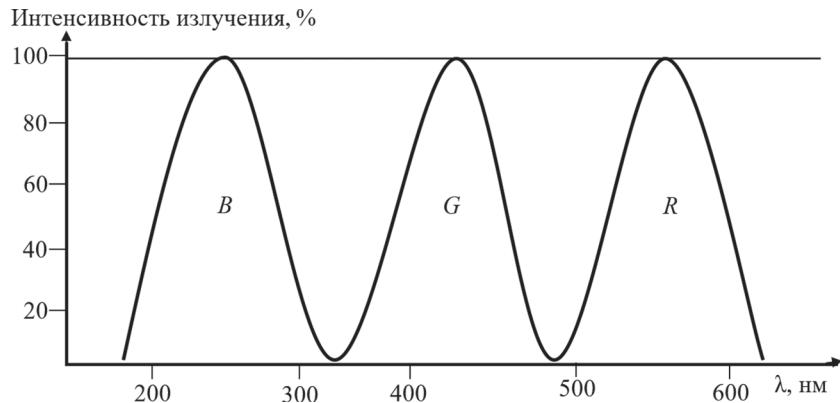


Рис. 3. Спектр светоизлучения, изготовленного по *RGB*-технологии:
B, G, R — синий, зеленый и красный типы [1]

характеристик, составляющих прибор излучающих чипов, что сказывается на цвете свечения в процессе работы. Также светоизлучатели применяют для дизайнерской и архитектурной подсветки, в электронных табло и видеоэкранах [15 — 17].

В отличие от *RGB*-диодов в люминофорном диоде комбинируются синий, фиолетовый или ультрафиолетовый полупроводниковые излучатели и люминофорный конвертер. Это позволяет изготовить недорогой источник света с хорошими характеристиками. Самая распространенная конструкция такого светового диода содержит синий полупроводниковый чип нитрида галлия, модифицированный индием (*InGaN*), и люминофор с максимумом излучения желтого цвета — иттрий-алюминиевый гранат, легированный трехвалентным церием [18]. Часть мощности излучения исходного чипа покидает корпус светоизлучателя, рассеиваясь в слое люминофора [19].

Другая часть поглощается люминофором и переизлучается в области меньших значений энергии [20]. Спектр переизлучения захватывает широкую область от красного до зеленого, однако, результирующий спектр данного диода — ярко белый свет (рис. 4).

Путем комбинации различных типов люминофоров выпускают светоизлучатели с разной цветовой температурой («теплые» и «холодные»). Срок службы люминофорного диода зависит от многих параметров, но в основном от особенностей самого чипа и изменения свойств люминофора с течением времени наработки (деградации). Основной фактор, влияющий на срок службы, — температура.

При работе светоизлучателя чип нагревается и его температура достигает 70...80 °C, и это приводит к появлению дефектов в активном слое, увеличению диффузии и изменению оптических свойств подложки. Люминофор подвержен влиянию высокой температуры, при длительном воздействии излучательные центры ингибируются, и коэффициент преобразования, а также спектральные характеристики люминофора, ухудшаются.

В первых конструкциях светоизлучателей люминофор наносили прямо на полупроводниковый материал, и тепловое воздействие было максимальным, тогда как в современных светоизлучателях все чаще применяют конструкции изолированного и удаленного люминофоров.

Рассмотрим достоинства и недостатки люминофорных светоизлучателей.

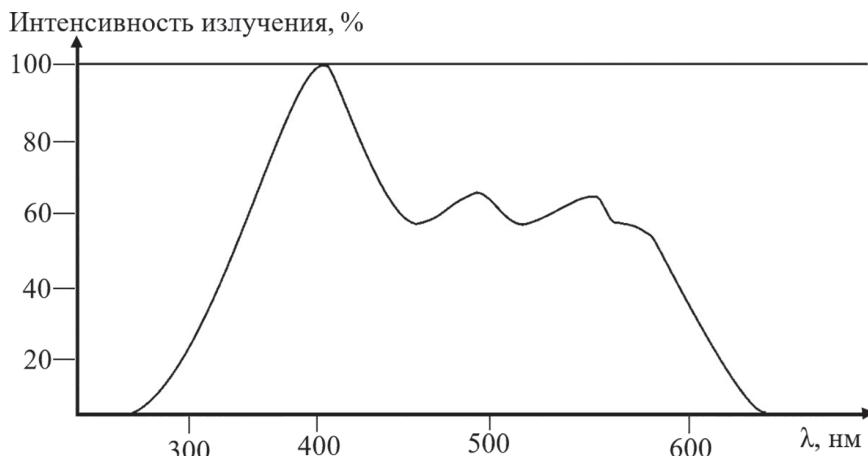


Рис. 4. Спектр светоизлучения, изготовленного по люминесцентной технологии [1]

Достоинства:

- высокий КПД;
- низкое энергопотребление, позволяющее применять их при длительном использовании в аварийном освещении;
- высокая надежность;
- большой срок службы;
- малый вес;
- безинерционность;
- устойчивая работа при отрицательных температурах;
- хорошая механическая прочность;
- безопасность;
- легкое регулирование мощности;
- низкая пожароопасность;
- влагостойкость;
- химическая нейтральность.

Недостатки:

- значительно дороже лампы накаливания;
- требует улучшенных драйверов;

Одно из перспективных направлений развития технологии белых светодиодов — исследование и поиск более эффективных и качественных люминофоров. Коэффициент преобразования люминофора влияет на общую эффективность светодиода и качество излучаемого света. Если в светодиодах еще можно как-то обойтись без люминофора, как, например в *RGB*-технологии, то при использовании лазерных диодов, КПД которых значительно выше, без хорошего люминофора не обойтись. Общий вид спектра лазерного осветительного устройства с люминофорным излучателем, полученный автором, дан на рис. 5.

Для анализа спектра лазерного осветительного устройства с люминофорным излучателем рассмотрим узконаправленный пучок монохроматического лазерного излучения с $\lambda = 410$ нм = $4,05 \cdot 10^{-7}$ м и мощностью $P = 50 \cdot 10^{-3}$ Вт. Допустим, что время излучения составляет $t = 1$ с, а угол расходимости $\phi = 2^\circ$, излучение падает перпендикулярно на люминофор *YAG:Ce³⁺*. Показатель рассеивания в данном случае будет равен

величине $\rho = 0,5$; $d = 0,02$ м — расстояние между лазерным диодом и люминофорным излучателем. Рассчитаем количество фотонов N , а также световой поток $\Phi_{\text{сн}}$, яркость B , освещенность E , светимость R_c , энергию одного фотона E_ϕ и полную энергию светового излучения W , попадающие на люминофорный излучатель.

Ввиду того, что поток излучения Φ равен энергии $E_{\text{об}}$, переносимой через исследуемую поверхность за единицу времени t , а мощность излучения равна P , найдем значение количества фотонов, участвующих в излучении, используя формулы вида:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \frac{E_{\text{об}}}{t} \\ P &= \Phi \end{aligned} \right\} P = \frac{E_{\text{об}}}{t}.$$

На основании теории Планка энергия светового излучения представляется в виде множества парциальных значений энергии, квантов, определяющихся по следующему выражению:

$$E_{\text{об}} = N E_\phi,$$

где E_ϕ — энергия одного фотона.

Для определения значения N получим:

$$E_\phi = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4,1 \cdot 10^{-7}} \approx 4,9 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Количество фотонов:

$$N = \frac{E_{\text{об}}}{E_\phi} = \frac{4,9 \cdot 10^{-2}}{4,9 \cdot 10^{-19}} = 10^{17}.$$

Найдем световой поток лазерного излучения $\Phi_{\text{сн}}$. Учитывая, что световой поток — величина, пропорциональная потоку излучения, оцененному в соответствии с относительной спектральной чувствительностью среднего человеческого глаза, при наличии монохроматического излучения с длиной волны λ , поток излучения которого равен Φ , то световой поток $\Phi_{\text{сн}}$ такого излучения определяется формулой вида:

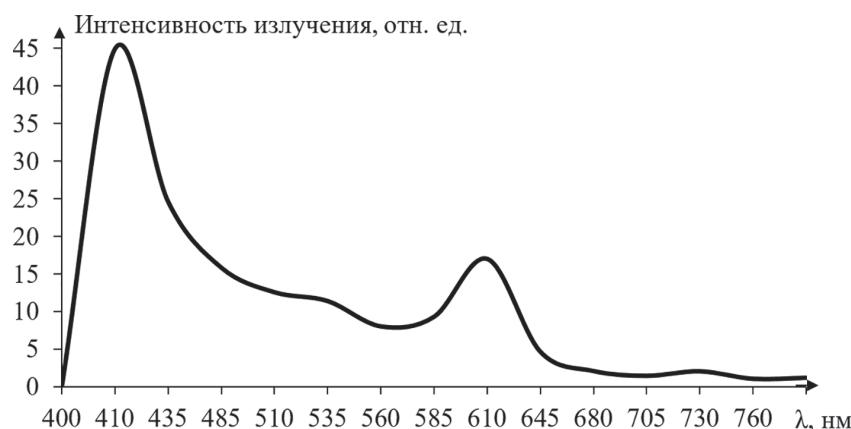


Рис. 5. Спектр лазерного осветительного устройства с люминофорным излучателем [13]

$$\Phi_{\text{сп}} = K_m V(\lambda) \Phi,$$

где K_m — коэффициент, определяющейся используемой системой единиц (в системе СИ равен 683 лм/Вт); $V(\lambda)$ — нормирована в максимуме на единицу чувствительности среднего человеческого глаза при дневном зрении.

Получим значение основной светотехнической характеристики $\Phi_{\text{сп}}$:

$$\Phi_{\text{сп}} = K_m V(\lambda) \Phi = 683 \cdot 1 \cdot 4,9 \cdot 10^{-2} \approx 33,4 \text{ лм.}$$

Определив $\Phi_{\text{сп}}$, найдем величины освещенности E , яркости B и светимости R_c :

$$E = \Phi_{\text{сп}} / S;$$

$$R_c = \rho E = \rho \frac{\Phi_{\text{сп}}}{S};$$

$$B = \frac{R_c}{\pi}.$$

Поскольку известна расходимость пучка и высота, на которой размещен лазерный диод, можно найти площадь S создаваемого им пятна:

$$R = d \operatorname{tg}(\phi) = 0,02 \cdot 0,035 \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$S = \pi R^2 = 3,14 \cdot 49 \cdot 10^{-8} \approx 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$E = \frac{\Phi_{\text{сп}}}{S} = \frac{33,4}{1,54 \cdot 10^{-6}} = 21,7 \cdot 10^6 \text{ лк};$$

$$R_c = \rho E = 0,55 \cdot 21,7 \cdot 10^6 = 11,9 \cdot 10^6 \text{ лк};$$

$$B = \frac{R_c}{\pi} = \frac{11,9 \cdot 10^6}{3,14} \approx 3,8 \cdot 10^6 \text{ кд/м}^2.$$

Полная энергия испускаемого светового потока W выглядит как произведение мощности излучения P и времени излучения t :

$$W = Pt = 50 \text{ мВт}\cdot\text{с.}$$

Таким образом, полученные результаты светового потока для лазерных осветительных устройств позволяют оценить световую отдачу, которая составляет величину порядка 240 лм/Вт, что заметно превышает значения световой отдачи для светодиодов и ртутных ламп.

При сравнении спектров излучения светодиода и лазерного светильника можно выделить общую особенность, заключающуюся в наличии максимума спектра в синем и УФ-диапазоне длины волны (~ 400 нм). Анализ проведенных медицинских исследований показал, что данный спектр негативно влияет на зрение людей, поэтому при развитии технологии лазерного освещения эту особенность следует нивелировать, что является вполне решаемой задачей, чего однако нельзя утверждать про светодиоды. В идеале спектр лазерного светильника должен регулироваться в зависимости от условий и требований, но базовый спектр такого светильника должен быть по форме близок к спектру излучения Солнца (рис. 6) в видимом диапазоне длин волн, ведь именно к такому спектру максимально приспособлен человеческий глаз.

Технологический процесс изготовления люминофоров довольно сложен. Он включает в себя очистку исходного сырья, приготовление и прокаливание шихты, очистку полученного продукта, измельчение и фракционирование, дополнительную очистку и специальную обработку. Очистка сырья до очень высокой степени чистоты ведется дистилляцией, возгонкой, осаждением примесей, перекристаллизацией из реактора с помощью подменных смол и активных поглотителей.

Поскольку от степени измельчения исходных составляющих зависит гранулометрический состав конечного продукта, то сырьевые материалы часто размалывают и просеивают. Из подготовленного сырья

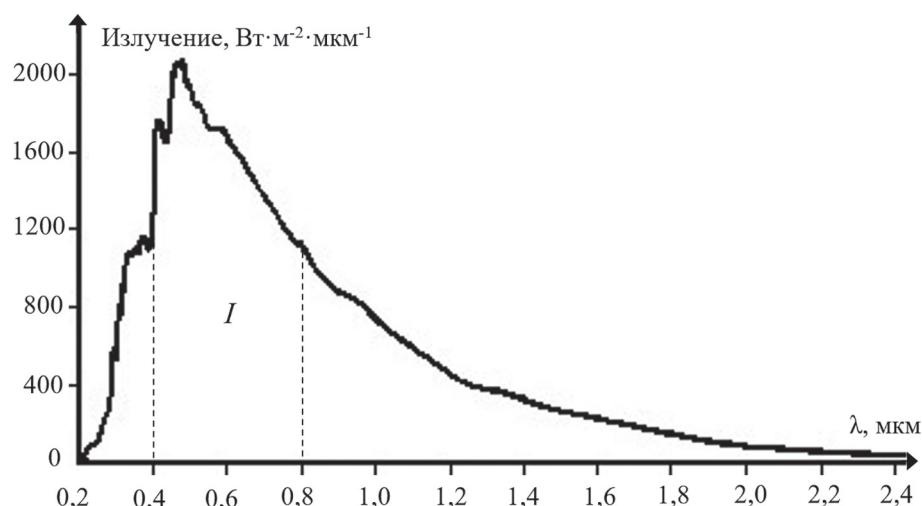


Рис. 6. Спектр излучения Солнца:
I — область видимого спектра излучения [1]

составляют смесь (шихту), которую после тщательного перемешивания засыпают в кварцевые кюветы и прокаливают в электрических высокотемпературных печах. Температура прокаливания — 1070...1670 °C. Для предохранения продуктов синтеза от переокисления прокалку ведут в среде инертного газа или используют защитные свойства расплава плавней.

Плавни — легкоплавкие соединения (типа хлористых соединений калия, магния), вводимые в состав шихты для облегчения формирования нужной кристаллической решетки люминофора. В результате прокаливания получают новое вещество, состоящее из трех частей: основания, активатора и примесей от плавней.

Основание представляет собой полупроводник или диэлектрик, образует кристаллическую решетку люминофора, в значительной степени определяя его физические, химические и адгезионные свойства.

Активаторы во многих люминофорах являются той обязательной компонентой, которая определяет люминесценцию вещества, его цветность и т. д. В качестве активизирующего вещества берут медь, серебро, марганец, сурьму, титан и др. Иногда применяют не один активатор, а два или три. Место введения его в кристаллическую решетку основного вещества является центром люминесцентного излучения.

Активатор вводят в количестве тысячных и десяти тысячных долей грамма на каждый грамм основного вещества. Он должен быть равномерно распределен по всей массе основания и находиться в связанном состоянии. Избыток активатора ухудшает стабильность и другие важные свойства люминофора.

Введение двух и более активаторов преследует две основные цели: получить излучение от активаторов в разных диапазонах длин волн и достичь возбуждения активного центра, если он непосредственно не может возбудиться обычным способом. В этом случае специально вводимый для возбуждения активатор называют сенсибилизатором. Примером служит галоfosфат кальция, активированный сурьмой и марганцем. В данном случае сенсибилизатором выступает сурьма. Поглощая ультрафиолетовое излучение из области воздействующего излучения, сурьма часть этой энергии преобразует в собственную полосу излучения, а другую передает марганцу, который, возбуждаясь таким образом, излучает отличную от сурьмы полосу.

Существует группа так называемых неактивированных или самоактивированных люминофоров, центрами свечения у которых являются дефекты в кристаллической решётке основания, создаваемые не постоянными примесями (активаторами), а частичным термическим разложением основания.

Синтезированное вещество люминофора после охлаждения просматривают при ультрафиолетовом освещении для отбраковки частей и включений, с недоста-

точным включением или светящихся другим цветом. Затем люминофор размельчают и просеивают. В некоторых случаях проводят так называемое фракционирование, т. е. отделение зерен люминофора с нужными размерами и формой. Большая однородность люминофора по гранулометрическому составу заметно улучшает его основные характеристики. Длительность размола готового люминофора должна быть ограничена, так как при размоле неизбежно идет разрушение центров свечения и снижение световой отдачи состава.

Предварительное строго регламентируемое измельчение исходных сырьевых материалов существенно сокращает длительность размола. Кроме того, такая подготовка сырья уменьшает время спекания, поскольку скорость твердотельных реакций синтеза прямо пропорциональна удельной поверхности реагируемых компонентов.

В процессе получения люминофоров заключительными операциями являются дополнительная очистка и специальная обработка. При очистке из люминофора удаляют непрореагировавшие частицы шихты, избыточное количество активаторов и частицы расплава.

Специальная обработка порошка люминофора предусматривает создание на поверхности зерен люминофора тончайших слоев соединения, повышающих агрегатную стойкость, стабильность в процессе эксплуатации, меняющих электрические свойства материала и т. д. Эта обработка ведется в парах или растворах химических веществ.

Из описания технологии люминофоров видно, что наука далеко продвинулась в этой области, особенно в XX в. Работы в данной области начались в 1669 г. когда Хенинг Брандт открыл свечение фосфора. В начале XX в. С.И. Вавилов предложил использовать люминофорное свечение для нового направления в светотехнике того времени — газоразрядных лампах [22], а затем О.В. Лосев обнаружил свечение электролюминесценции [23], которое легло в основу светодиодов, а Сюдзи Накамура сначала разработал синий светодиод, а затем на его основе белый светодиод с люминофором [24] и получил за это Нобелевскую премию.

В настоящее время известно большое количество видов люминесценции (табл. 1). Количество современных люминофоров составляет сотни, а веществ, используемых для их производства, — тысячи. В качестве примера, в табл. 2 представлены основные характеристики люминофора ЛСИД-560 российского производства, хорошо показавшего себя в системах освещения с лазерной инжекцией синим лазерным диодом ($\lambda = 400\ldots480$ нм).

Люминофоры разного состава обеспечивают люминесценцию в различных областях спектра. Для создания источников «белого» света, спектр которого максимально приближен к спектру солнечного света,

Таблица 1

Виды люминесценции по типу возбуждения

Название люминесценции	Вид поглощенной энергии
Фотолюминесценция	Электромагнитное излучение (УФ- и видимый свет)
Рентгенолюминесценция	Электромагнитное излучение (рентгеновское)
Катодолюминесценция	Кинетическая энергия электронов
Электролюминесценция	Энергия электрического поля
Хемилюминесценция	Энергия химической реакции
Биолюминесценция	Энергия биохимической реакции
Триболюминесценция	Механическая энергия трения
Термолюминесценция	Температурная энергия

Таблица 2

Основные характеристики люминофора ЛСИД-560 (по данным производителя)

Наименование показателя	Норма	Значения
Внешний вид	Мелкодисперсионный порошок светло-жёлтого цвета*	
Характерный запах		Отсутствует
Длина волны максимума спектра люминесценции в видимой области спектра, нм, при $\lambda_{\text{max возбужд}} = 450$ нм	550±10	552
Длина волны главного максимума возбуждения люминесценции в видимой области спектра, нм	450±10	450
Яркость относительно стандартного образца, %, не менее	90	98
Средний размер частиц, мкм	факультативно	6,2
Термостойкость, °С, не менее	250	350
pH водной суспензии, отн. ед.	6,0...8,0	7,0

* — допускается наличие слабого оттенка

использовали фотолюминофоры на основе галофосфатов кальция, активированных ионами Mn, Sb и др.

В начале XXI в. при производстве люминофорных систем стали применять алюматы стронция и бария, активированные ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), таких как Tb, Eu и др., SrAlO₄Y₂O₅S, активированный ионами Eu и Dy, обладающими длительным послесвечением до десяти ч.

Основная задача производителей состоит в том, чтобы получить люминофоры с нужными характеристиками. В 1852 г. Дж. Г. Стокс сформулировал правило о том, что длина волны фотолюминесценции больше длины волны возбуждающего света. Это значит, что происходит потеря энергии, а, следовательно, люминофоры должны иметь большую энергию выхода. Однако только несколько процентов из всех люминофоров имеют выход энергии 0,8...0,9, остальные значительно ниже. В то же время, существуют антистоковские люминофоры (в том числе с применением ИК-лазеров для возбуждения), у которых длина волны спектра, излучаемого люминофором, меньше возбуждаемого луча, но выход в таких люминофорах составляет всего 0,2...0,3 [25, 26].

Выводы

Работа над люминофорами — неотъемлемая часть процесса исследований и разработок в современной светотехнике. Область применения люминофорных источников света очень обширна. По данным журнала «Светотехника» за год в мире продается 27 млрд электрических ламп для освещения. По дорогам планеты Земля передвигается около миллиарда автомобилей. По данным ассоциации американских инженеров (Society of Automotive Engineers (SAE)), на современном автомобиле (в том числе электромобиле) имеется от 50 до 100 источников света различного назначения. Если учесть и иные области применения источников светового излучения на базе люминофоров, такие как информационные системы, экраны телевизоров, осциллографов, электронных приборов и, наконец, обычных мобильных телефонов, выпускающихся миллиардами, и принимая во внимание то, что в недалеком будущем, как предсказывает лауреат Нобелевской премии Сюдзи Накамура, источниками света будут только лазерные диоды с люминофором, использование люминофоров будет практически повсеместно, что требует особого внимания к данного типа материалам.

Литература

- Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1971.
- Žukauskas A., Vaicekauskas R., Shur M. Solid-state Lamps with Optimized Color Saturation Ability // Optics Express. 2010. V. 18. No. 3. Pp. 2287—2295.
- Chang C.-Y. e. a. Broadening Phosphor-converted Light-emitting Diode Emission: Controlling Disorder // Chemistry of Materials. 2022. V. 34(22). Pp. 10190—10199.
- Бадгутдинов М.Л. и др. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики свето-диодов белого свечения на основе *p-n*-гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40. № 6. С. 758—763.
- Preuster P., Wasserscheid P., Papp C. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCS): Toward a Hydrogen-free Hydrogen Economy // Accounts of Chem. Research. 2017. V. 50(1). Pp. 74—85.
- Burhan M., Shahzad M.W., Ng K.C. Hydrogen at the Rooftop: Compact CPV-hydrogen System to Convert Sunlight to Hydrogen // Appl. Thermal Eng. 2018. V. 132. C. 154—164.
- George N.C., Denault K.A., Seshadri R. Phosphors for Solid-state White Lighting // Annual Rev. Mater. Res. 2013. V. 43. Pp. 481—501.
- Kolmann S.J., Chan B., Jordan M.J.T. Modelling the Interaction of Molecular Hydrogen with Lithium-doped Hydrogen Storage Materials // Chem. Phys. Lett. 2008. V. 467. No. 1—3. Pp. 126—130.
- Shirasaki, Y., Supran, G.J., Bawendi, M.G., Bulović, V. Emergence of Colloidal Quantum-dot Light-emitting Technologies // Nature Photonics. 2013. V. 7(1). Pp. 13—23.
- Jiang H.-L., Singh S.K., Yan J.-M., Zhang X.-B., Xu Q. Liquid-phase Chemical Hydrogen Storage: Catalytic Hydrogen Generation under Ambient Conditions // Chemistry and Sustainability, Energy and Materials. 2010. V. 3. No. 5. Pp. 541—549.
- Пат. № 197045 РФ. Светопередающий модуль системы беспроводной связи по технологии VLC / Скворцов А.А., Зуев С.М. // Бюл. изобрет. 2020. № 9.
- Li Y., Yang R.T. Hydrogen Storage in Metal-organic Frameworks by Bridged Hydrogen Spillover // J. American Chem. Soc. 2006. V. 128(25). Pp. 8136—8137.
- Kamegawa A., Okada M. Hydrogen Storage Technology in High Pressure Science Storaging Tank Engineering Engineering and Hydrogen Storage Media // Koatsuryoku No Kagaku To Gijutsu. 2007. V. 17. No. 2. Pp. 173—179.
- Зуев С.М., Варламов Д.О., Кукса В.В. К анализу характеристик лазерного осветительного устройства // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 6. С. 57—62.
- Tarasov B.P., Lototskii M.V., Yartys' V.A. Problem of Hydrogen Storage and Prospective Uses of Hydrides for Hydrogen Accumulation // Russian J. General Chem. 2007. V. 77(4). Pp. 694—711.

References

- Gurvich A.M. Vvedenie v Fizicheskuyu Khimiyu Kristallofosforov. M.: Vysshaya Shkola, 1971. (in Russian).
- Žukauskas A., Vaicekauskas R., Shur M. Solid-state Lamps with Optimized Color Saturation Ability. Optics Express. 2010;18;3:2287—2295.
- Chang C.-Y. e. a. Broadening Phosphor-converted Light-emitting Diode Emission: Controlling Disorder. Chemistry of Materials. 2022;34(22):10190—10199.
- Badgutdinov M.L. i dr. Spektry Lyuminestsentsii, Effektivnost' i Tsvetovye Kharakteristiki Svetodiodov Belogo Svecheniya na Osnove *p-n*-Geterostruktur InGaN/GaN, Pokrytykh Lyuminoforami. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov. 2006;40;6:758—763. (in Russian).
- Preuster P., Wasserscheid P., Papp C. Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCS): Toward a Hydrogen-free Hydrogen Economy. Accounts of Chem. Research. 2017;50(1):74—85.
- Burhan M., Shahzad M.W., Ng K.C. Hydrogen at the Rooftop: Compact CPV-hydrogen System to Convert Sunlight to Hydrogen. Appl. Thermal Eng. 2018;132: 154—164.
- George N.C., Denault K.A., Seshadri R. Phosphors for Solid-state White Lighting. Annual Rev. Mater. Res. 2013;43:481—501.
- Kolmann S.J., Chan B., Jordan M.J.T. Modelling the Interaction of Molecular Hydrogen with Lithium-doped Hydrogen Storage Materials. Chem. Phys. Lett. 2008;467;1—3:126—130.
- Shirasaki, Y., Supran, G.J., Bawendi, M.G., Bulović, V. Emergence of Colloidal Quantum-dot Light-emitting Technologies. Nature Photonics. 2013;7(1): 13—23.
- Jiang H.-L., Singh S.K., Yan J.-M., Zhang X.-B., Xu Q. Liquid-phase Chemical Hydrogen Storage: Catalytic Hydrogen Generation under Ambient Conditions. Chemistry and Sustainability, Energy and Materials. 2010;3;5:541—549.
- Pat № 197045 RF. Svetoperedayushchiy Modul' Sistemy Besprovodnoy Svyazi po Tekhnologii VLC. Skvorcov A.A., Zuev S.M. Byul. Izobret. 2020;9. (in Russian).
- Li Y., Yang R.T. Hydrogen Storage in Metal-organic Frameworks by Bridged Hydrogen Spillover. J. American Chem. Soc. 2006;128(25):8136—8137.
- Kamegawa A., Okada M. Hydrogen Storage Technology in High Pressure Science Storaging Tank Engineering Engineering and Hydrogen Storage Media. Koatsuryoku No Kagaku To Gijutsu. 2007;17;2: 173—179.
- Zuev S.M., Varlamov D.O., Kuksa V.V. K Analizu Kharakteristik Lazernogo Osvetitel'nogo Ustroystva. Pribory i Tekhnika Eksperimenta. 2021;6:57—62. (in Russian).
- Tarasov B.P., Lototskii M.V., Yartys' V.A. Problem of Hydrogen Storage and Prospective Uses of Hydrides for Hydrogen Accumulation. Russian J. General Chem. 2007;77(4):694—711.

16. Grigoriev S.A., Porembsky V.I., Fateev V.N. Pure Hydrogen Production by PEM Electrolysis for Hydrogen Energy // Intern. J. Hydrogen Energy. 2006. V. 31(2). Pp. 171—175.
17. Gong L. e. a. Spontaneous Ignition of High-pressure Hydrogen During its Sudden Release into Hydrogen/air mixtures // Intern. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43(52). Pp. 23558—23567.
18. Aminov R.Z., Egorov A.N. Hydrogen-oxygen Steam Generation for a Closed Hydrogen Combustion Cycle // Intern. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44(21). Pp. 11161—11167.
19. Startsev A.N. Hydrogen Sulfide as a Source of Hydrogen Production // Russian Chem. Bull. 2017. V. 66(8). Pp. 1378—1397.
20. Chen L., Lin C.C., Yeh C.W., Liu R.S. Light Converting Inorganic Phosphors for White Light-emitting Diodes // Materials. 2010. V. 3. Pp. 2172—2195.
21. Wang F., Wang W., Zhang L., Zheng J., Jin Y., Zhang J. Luminescence Properties and Its Red Shift of Blue-emitting Phosphor $\text{Na}_3\text{YSi}_3\text{O}_9:\text{Ce}_3^+$ for UV LED // RSC Adv. 2017. V. 7. Pp. 27422—27430.
22. Вавилов С.И. Собрание сочинений. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
23. Лосев О.В. Фотоэлектрический эффект в любом активном слое карборунда // Журнал технической физики. 1931. Т. 1. № 7. С. 718—724.
24. Nakamura S. InGaN/AlGaN Blue-light-emitting Diodes // J. Vacuum Sci. & Technol. 1995. A13. Pp. 705—710.
25. Чукова Ю.П. Антистоксова люминесценция и новые возможности ее применения. М.: Советское радио, 1980.
26. Близнюк В.В., Ивакин Ю.Д., Коваль О.И., Мансурова Н.Г., Арсеньев И.П. Спектры стоксовской и антистоксовской люминесценции гидроксиапатита кальция // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы докл. Междунар. науч.-техн. семинара. М.: Изд-во НИУ «МЭИ», 2009.
16. Grigoriev S.A., Porembsky V.I., Fateev V.N. Pure Hydrogen Production by PEM Electrolysis for Hydrogen Energy. Intern. J. Hydrogen Energy. 2006;31(2): 171—175.
17. Gong L. e. a. Spontaneous Ignition of High-pressure Hydrogen During its Sudden Release into Hydrogen/air mixtures. Intern. J. Hydrogen Energy. 2018;43(52): 23558—23567.
18. Aminov R.Z., Egorov A.N. Hydrogen-oxygen Steam Generation for a Closed Hydrogen Combustion Cycle. Intern. J. Hydrogen Energy. 2019;44(21): 11161—11167.
19. Startsev A.N. Hydrogen Sulfide as a Source of Hydrogen Production. Russian Chem. Bull. 2017;66(8): 1378—1397.
20. Chen L., Lin C.C., Yeh C.W., Liu R.S. Light Converting Inorganic Phosphors for White Light-emitting Diodes. Materials. 2010;3:2172—2195.
21. Wang F., Wang W., Zhang L., Zheng J., Jin Y., Zhang J. Luminescence Properties and Its Red Shift of Blue-emitting Phosphor $\text{Na}_3\text{YSi}_3\text{O}_9:\text{Ce}_3^+$ for UV LED. RSC Adv. 2017;7:27422—27430.
22. Vavilov S.I. Sobranie Sochineniy. Т. 2. М.: Izd-vo AN SSSR, 1952. (in Russian).
23. Losev O.V. Fotoelektricheskiy Effekt v Lyubom Aktivnom Sloe Karborunda. Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki. 1931;1;7:718—724. (in Russian).
24. Nakamura S. InGaN/AlGaN Blue-light-emitting Diodes. J. Vacuum Sci. & Technol. 1995. A13:705—710.
25. Chukova Yu.P. Antistoksova Lyuminestsentsiya i Novye Vozmozhnosti Ee Primeneniya. M.: Sovetskoe Radio, 1980. (in Russian).
26. Bliznyuk V.V., Ivakin Yu.D., Koval' O.I., Mansurova N.G., Arsen'ev I.P. Spektry Stoksovskoy i Antistoksovskoy Lyuminestsentsii Gidroksiapatita Kal'tsiya. Shumovye i Degradsionnye Protsessy v Poluprovodnikovykh Priborakh: Materialy Dokl. Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Seminara. M.: Izd-vo NIU «MEI», 2009. (in Russian).

Сведения об авторе:

Зуев Сергей Михайлович — кандидат физико-математических наук, доцент МИРЭА — Российский технологический университет, e-mail: sergei_zuev@mail.ru

Information about author:

Zuev Sergey M. — Ph.D. (Phys.-Math.), Assistant Professor of MIREA — Russian Technological University, e-mail: sergei_zuev@mail.ru

Работа выполнена при поддержке: Российского научного фонда (грант № 23-29-00079), <https://rscf.ru/project/23-29-00079/>

The work is executed at support: Russian Science Foundation (Grant No. 23-29-00079), <https://rscf.ru/project/23-29-00079/>

Статья поступила в редакцию: 10.11.2022

The article received to the editor: 10.11.2022

Статья принята к публикации: 06.06.2023

The article has been accepted for publication: 06.06.2023