

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИГОДНОСТИ ФОТОЛЮМИНОФОРНЫХ СУСПЕНЗИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

© 2012 г. Д. Н. Хмиль, аспирант; А. М. Камуз, доктор физ.-мат. наук;  
П. Ф. Олексенко, доктор техн. наук, чл.-кор. НАНУ; Н. Г. Алексенко; О. А. Камуз

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев

E-mail: deniskhmil@ukr.net

Разработан экспресс-метод определения пригодности фотолюминофорных суспензий для изготовления белых светодиодов. Метод испытан на трех типах фотолюминофоров с коэффициентами поглощения в области излучения синих светодиодов 454–464 нм от нескольких обратных сантиметров до порядка  $10^4$  см<sup>-1</sup>. Экспериментально установлено, что для определения пригодности этого метода необходимо провести всего лишь одно измерение.

*Ключевые слова:* белый светодиод, фотолюминофор, фотолюминофорная суспензия.

Коды OCIS: 160.2540.

Поступила в редакцию 21.12.2010.

### Введение

Переход на светодиодные источники света является одним из перспективных направлений в современной светотехнике. В настоящее время в мире на освещение используется 21% от общего количества потребляемой электроэнергии. Экспертные оценки показывают, что использование новых источников света (белых светодиодов) позволит значительно понизить потребление электрической энергии, используемой на освещение. Световая отдача белых светодиодов сегодня достигла значений порядка 100 лм/Вт в промышленности и 230 лм/Вт – в исследовательских лабораториях. Эффективность белых светодиодов в значительной мере определяется параметрами люминофорных преобразователей спектров синих светодиодов. Для дальнейшего повышения эффективности белых светодиодов необходимо разрабатывать новые фотолюминофорные материалы.

Поэтому поиск и разработка новых фотолюминофорных материалов, оптимизация их характеристик и характеристик светоизлучающей структуры в целом являются в настоящее время важной научной и практической задачей.

В данной работе предлагается простой способ оценки характеристик фотолюминофора для получения высоких стандартов белого света.

### Постановка задачи

Во время отработки технологического процесса синтеза фотолюминофоров для белых светодиодов технологам необходимо знать, какие изменения технологического режима синтеза приводят к улучшению, а какие – к ухудшению цветовых характеристик люминофора с точки зрения применимости фотолюминофоров для белых светодиодов. Цветовые характеристики системы фотолюминофор–синий светодиод определяются четырьмя параметрами: спектром люминесценции фотолюминофора, длиной волны синего светодиода (обычно 460 нм), концентрацией порошка фотолюминофора в суспензии и толщиной пленок. Процедура определения оптимальных значений этих параметров очень сложна и трудоемка. Для определения оптимальных значений необходимо, как правило, изготовить и испытать несколько десятков пробных образцов. Однако даже после таких трудоемких и дорогостоящих испытаний нет уверенности в том, что определенные эмпирическим путем оптимальные параметры системы фотолюминофор–синий светодиод позволяют получать наилучшие для данного фотолюминофора координаты цветности, т. е. полностью использовать его потенциал. Под оптимальными параметрами понимают наименьшую разницу цвета (НРЦ) фотолюминофора и белого света [1].

## Основной материал и результаты

Суть метода состоит в том, что координаты цветности светодиода, со слоем фотолюминофора на нем, линейно смещаются при возрастании концентрации фотолюминофора в пленке суспензии или ее толщины.

Разработанный нами экспресс-метод позволяет установить, насколько подходит фотолюминофорная суспензия для изготовления белых светодиодов, т. е. определить ее НРЦ, выполнив всего лишь одно измерение. При этом пробный образец может иметь концентрацию испытуемого фотолюминофора в пленке и ее толщину в пределах 30–70% и 20–100 мкм соответственно.

По результатам цветовых измерений для каждого испытуемого фотолюминофора вычисляется значение разницы цвета  $d$ , которую будет иметь система фотолюминофор–синий светодиод при оптимальных значениях концентрации люминофора в суспензии и толщины слоя суспензии ( $d$  – НРЦ люминофора и белого света). Очевидно, что чем меньше цветное расстояние  $d$  фотолюминофора, тем лучше он подходит для изготовления на его основе белых светодиодов.

Для определения диапазона применимости метода мы использовали фотолюминофоры с разными значениями коэффициента поглощения ( $k$ ) в области излучения синих светодиодов (454–464 нм). Образцы пленок наносились на покровные стекла толщиной 2 мм и возбуждались синими светодиодами с максимумами излучения в диапазоне длин волн 454–464 нм. В качестве точки белого света взята точка равной энергии  $E$ .

### Фотолюминофор с большим значением коэффициента поглощения

В качестве фотолюминофора с большим коэффициентом поглощения мы выбрали фотолюминофор  $(Y_{1-x}Gd_x)_3Al_5O_{12}:Ce$  (иттрий алюминиевый гранат, легированный церием). Коэффициенты поглощения на длинах волн 440 и 490 нм равны соответственно 690 и 390  $см^{-1}$  (максимум порядка  $8 \times 10^2$   $см^{-1}$ ); полоса люминесценции – с максимумом на длинах волн 560–570 нм. Отметим, что фотолюминофор  $(Y_{1-x}Gd_x)_3Al_5O_{12}:Ce$  был специально разработан для современных белых светодиодов [2]. На рис. 1 видно, что с увеличением концентрации или толщины пленки образца точки

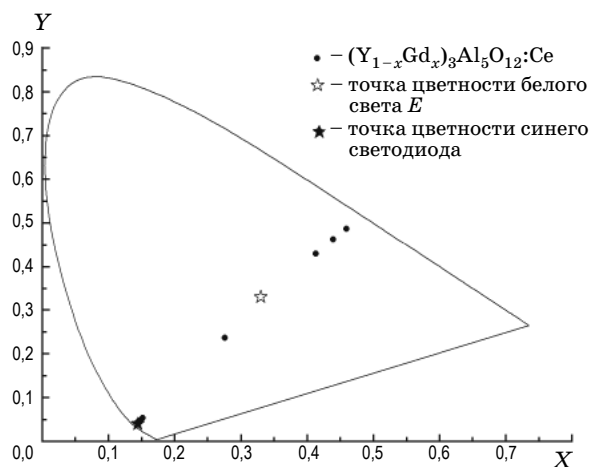


Рис. 1. Цветовой график системы XYZ с координатами цветности пленок суспензии фотолюминофора ФЛЖ-7 при возрастании концентрации люминофора или толщины.

цветности перемещаются по прямой линии и доходят почти до линии монохроматических излучений. Также видно, что при некоторых оптимальных значениях концентрации и толщины пленки эта линия проходит вблизи точки цветности белого света  $E$  равноинтенсивного излучения (на расстоянии  $d_1$ , см. таблицу).

### Фотолюминофоры со средними значениями коэффициентов поглощения

Были использованы выпускаемый фотолюминофор  $ZnCdS:Ag$  и фотолюминофор  $ZnS:CdS:Ag$ . Их коэффициенты поглощения на длинах волн 440 и 490 нм равны соответственно 239 и 100  $см^{-1}$  для фотолюминофора  $ZnCdS:Ag$  и 360 и 150  $см^{-1}$  – для фотолюминофора  $ZnS:CdS:Ag$ , т. е. область излучения синих светодиодов попадает на длинноволновую сторону хвоста полосы поглощения фотолюминофоров.

На рис. 2 видно, что при увеличении концентрации люминофора в пленке (или ее толщины) точки цветности тоже перемещаются по прямой линии и доходят почти до линии монохроматических излучений. Однако этого удается достичь при больших (почти в 2 раза) концентрациях или толщинах, чем в случае фотолюминофора  $(Y_{1-x}Gd_x)_3Al_5O_{12}:Ce$ . Также видно, что при некоторых оптимальных значениях концентрации и толщины эта линия проходит на некотором расстоянии  $d_2$  от точки цветности белого света  $E$  равноинтенсивного излучения ( $d_2 > d_1$ , см. таблицу).

Результаты экспериментов

№	Люминофор	НРЦ фотолуминофорной суспензии ( $d$ )	Наилучшая точка цветности, которую можно получить		Коэффициент поглощения, $\text{см}^{-1}$	
			$x$	$y$	$\lambda = 440 \text{ нм}$	$\lambda = 490 \text{ нм}$
1	$(Y_{1-x}Gd_x)_3Al_5O_{12}:Ce$	0,007	0,3360	0,3257	690	390
3	ZnCdS:Ag	0,023	0,3486	0,3160	239	100
4	$Ca_2BO_3Cl:Eu$	0,025	0,3504	0,3145	35	32
5	ZnS·CdS:Ag	0,03	0,3537	0,3114	360	150
6	$Li_2SrSiO_4:Eu$	0,046	0,3651	0,3	35	32

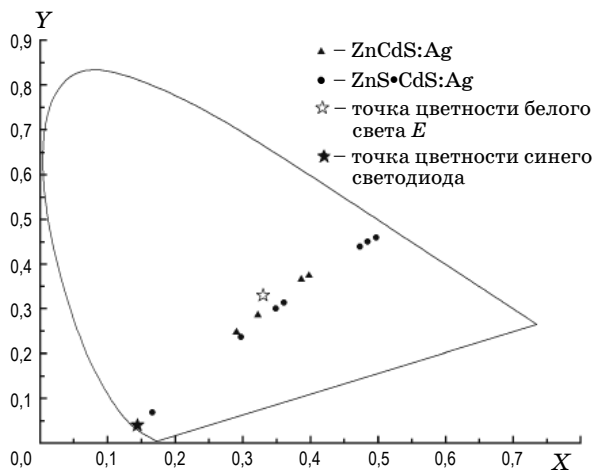


Рис. 2. Цветовой график системы XYZ с координатами цветности пленок суспензий фотолуминофоров ZnS·CdS:Ag и ZnCdS:Ag при возрастании концентрации люминофора или толщины.

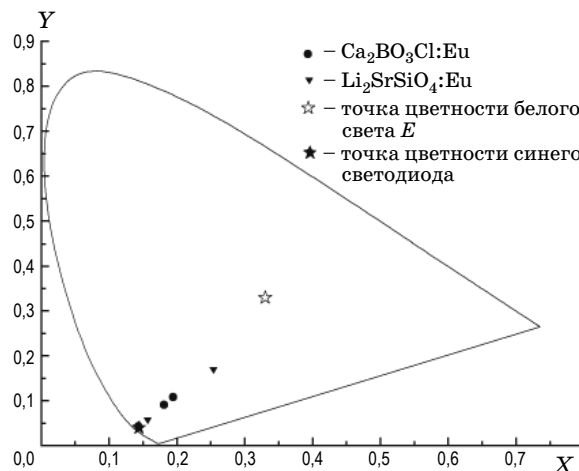


Рис. 3. Цветовой график системы XYZ с координатами цветности пленок суспензий фотолуминофоров  $Li_2SrSiO_4:Eu$  и  $Ca_2BO_3Cl:Eu$  при возрастании концентрации люминофора или толщины.

**Фотолуминофоры с малыми значениями коэффициентов поглощения**

В качестве фотолуминофоров с малыми коэффициентами поглощения мы выбрали фотолуминофоры  $Li_2SrSiO_4:Eu$  и  $Ca_2BO_3Cl:Eu$ . Кривые поглощения  $Li_2SrSiO_4:Eu$  и  $Ca_2BO_3Cl:Eu$  в диапазоне длин волн 440 и 490 нм практически совпадают. Коэффициенты поглощения на длинах волн 440 и 490 нм равны  $35$  и  $32 \text{ см}^{-1}$  соответственно. На рис. 3 видно, что точки цветности тоже перемещаются по прямой линии при увеличении концентрации люминофора в пленке (или ее толщины). Однако получить цветовые координаты вблизи точки  $E$  не удастся. Повышение концентрации (толщины) фотолуминофора в пленке суспензии приводит к сильному понижению интенсивности излучения синего светодиода и к незначительному увеличению люминесценции. Из рис. 3 также видно, что если бы точки цветности дошли до точки  $E$ , то они находились бы на линии,

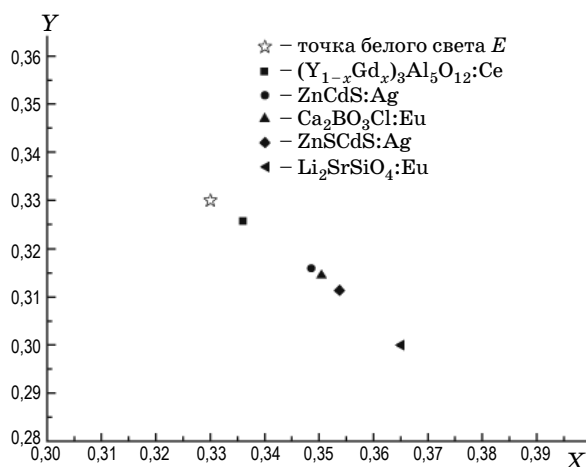


Рис. 4. НРЦ испытуемых люминофорных суспензий.

которая проходит на расстоянии  $d_3$  от точки цветности белого света  $E$  (см. таблицу).

Из рис. 4 и таблицы видно, что белые светодиоды будут иметь наилучшие параметры при ис-

пользовании люминофора  $(Y_{1-x}Gd_x)_3Al_5O_{12}:Ce$  и наихудшие – при использовании люминофоров  $Ca_2VO_3Cl:Eu$  и  $Li_2SrSiO_4:Eu$ .

### Выводы

Преимущества предложенного экспресс-метода состоят в том, что он позволяет сократить

процесс исследования люминофорных суспензий в десятки раз,

многократно понижает стоимость испытаний,

применим для исследования люминофорных суспензий с коэффициентами поглощения от нескольких обратных сантиметров до порядка  $10^4 \text{ см}^{-1}$ .

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шуберт Ф. // Светодиоды: пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 295–412.
  2. Abramov V., Soschin N., Sushkov V., Scherbakov N., Scherbakov V., Shishov A. Wave length shifting compositions for white emitting diode systems / Pat. 2006006002 WO. 19.01.2006.
-