

# Изготовление и испытание макетов светодиодных излучающих элементов

Афонин К.Н., Каменкова В.С., ГПО РЭТЭМ-1501

## Введение

Новым направлением в полупроводниковой светотехнике являются светодиодные лампы, внешне не отличающиеся от ламп накаливания. Вместо нити накала используются светодиодные излучающие элементы (СИЭ) типа filament. В настоящее время на территории Российской Федерации их не производят серийно. Основным производителем является Китай. В рамках ФЦП ТУСУР совместно с ООО «Руслед» разработали эскизный проект и изготовили макеты СИЭ. Как и для любых светодиодных ламп на основе кристаллов синего цвета свечения, необходимо создать высокоэффективную люминофорную композицию. Также важным вопросом для таких ламп является теплоотвод от СИЭ, который в основном обеспечивается за счёт заполнения колбы лампы инертным газом (аргоном, водородом гелием и т.д.).

## Исследование люминофоров

Тенденцией улучшения эффективности СИЭ белого цвета свечения является поиск и применение в технологии изготовления СИЭ люминофоров для люминофорной композиции, обеспечивающих наибольшее значение световой отдачи и максимальную близость координат цветности к кривой Планка [1 – 4].

Целью данной работы является исследование характеристик образцов люминофоров. Из цели вытекают следующие задачи:

- определение элементного состава люминофора;
- определение характерного размера частиц люминофора;
- изготовление макетов СИЭ и проведение исследований колориметрических характеристик и световой отдачи СИЭ.

Для исследования были взяты восемь образцов порошкообразных люминофоров (образцы №1–№4 — производство Тайвань, образец №5–№7 — производство Россия).

Исследование химического состава и оценка размеров частиц образцов люминофоров проводились на электронном сканирующем микроскопе SEM TM-1000 с системой микроанализа Hitachi TM-1000. Размеры частиц сведены в таблицу 1, на рисунке 2 приведена фотография с микроскопа. На рисунке 1 представлены результаты определения химического состава (в качестве примера для двух образцов).

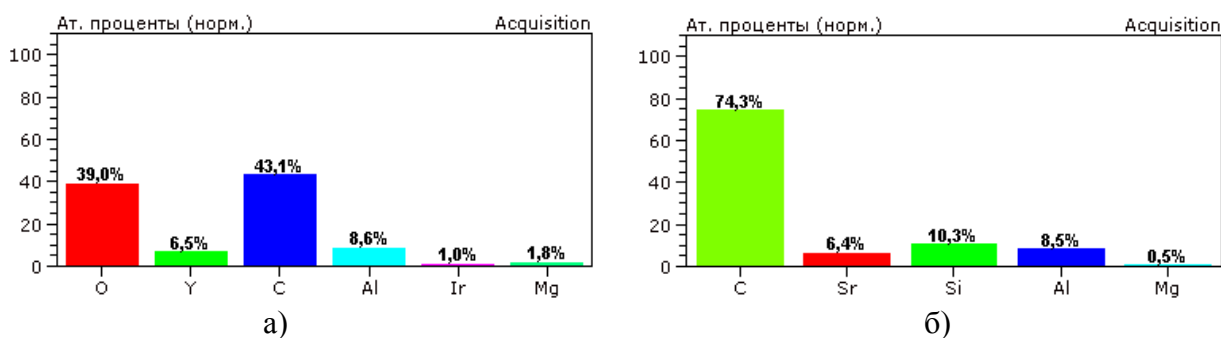


Рисунок 1 – Химический состав для двух образцов

Макетные образцы СИЭ были изготовлены с использованием излучающих чипов InGaN/GaN планарного типа на сапфировой подложке с длиной волны излучения  $\lambda = 460$  нм. Контакты современных нитридных кристаллов формируются на основе ИТО композиций для увеличения выхода света из структуры [5, 6]. Колориметрический анализ люминофоров проводился на спектроколориметре ТКА-ВД. Напряжение питания СИЭ  $U = 81$  В, потребляемый ток  $I = 10$  мА. Значения световой отдачи образцов люминофоров №1–№8, цветовая температура приведены в таблице 1.

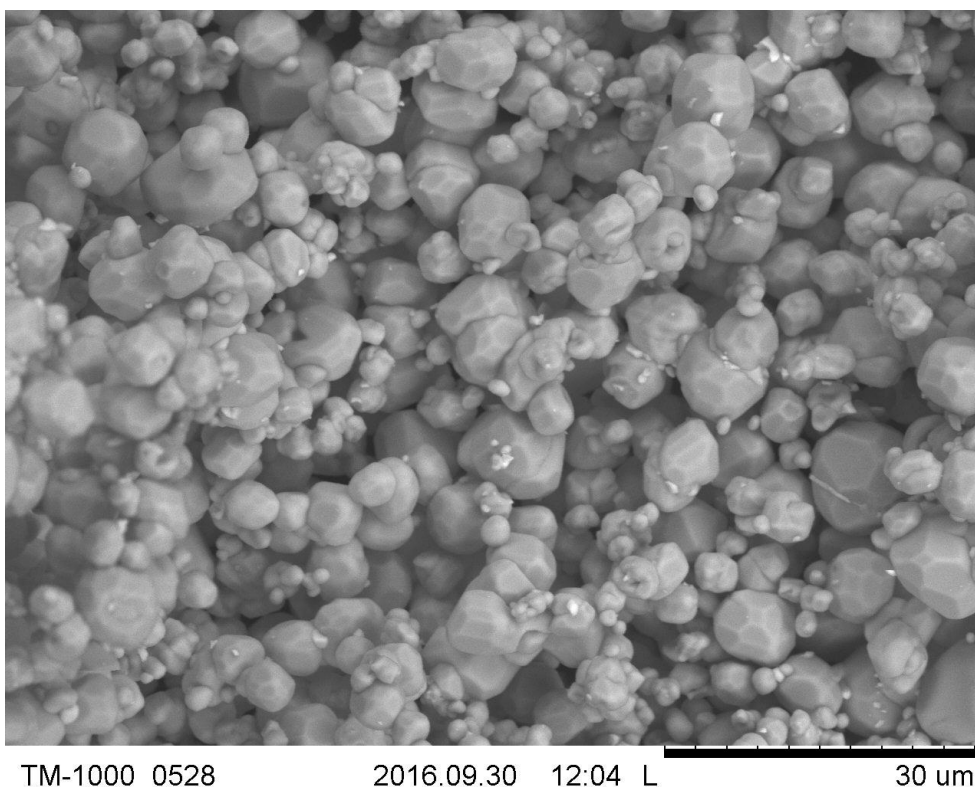


Рисунок 2 – Микрофотография образца люминофора

Таблица 1. Световая отдача и цветовая температура СИЭ с люминофорами, элементный состав и размеры частиц люминофоров

Номер образца люминофора	Световая отдача, лм/Вт	Цветовая температура, К	Размеры частиц, мкм
№1	100 ± 6	3800 – 4000	9 – 20
№2	100 ± 3	5200 – 5400	9 – 21
№3	103 ± 4	4400 – 4600	9 – 13
№4	101 ± 4	4200 – 4400	4,5 – 14
№5	100 ± 4	3800 – 4000	0,5 – 26,7
№6	95 ± 5	3700 – 4000	5 – 23,5
№7(красный)	55 ± 5	–	1,3 – 40,2
№8(желтый+красный 19:1)	125 ± 5	2500 – 3000	–

Композиция №8 из красного и желтого люминофора имеет высокую световую отдачу, так как более крупнозернистые люминофоры имеют большую световую отдачу. В связи с этим, образец №8 выбран для приготовления композиции, которая получилась эффективнее всех вариантов на 20%, и именно она выбрана для изготовления экспериментальных образцов СИЭ на данном этапе.

## Расчёт тепловых режимов СИЭ и прогнозирование срока службы

Для прогнозирования срока службы светодиодной лампы на основе СИЭ необходимо провести оценочные тепловые расчёты конструкции светодиодной лампы с учётом отсутствия конвекции и отводом тепла только через места контактной сварки к металлическим частям опорной конструкции внутри колбы лампы.

Способность отвода тепла от активной области кристалла – тепловое сопротивление, определяется по следующие формулы [7 – 9]:

$$P_e = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}, \quad (1)$$

где  $P_e$  – мощность, рассеиваемая в данном компоненте;  $T_1$ ,  $T_2$  – значения температуры двух тел или тела и среды ( $T_1$  – более высокая температура, чем  $T_2$ );  $R_t$  – тепловое сопротивление.

Для послойной оценки тепловое сопротивление для каждого слоя приближённо определяется по формуле [7, 8]:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – толщина слоя (м);  $S$  – площадь слоя (м<sup>2</sup>);  $\lambda$  – теплопроводность вещества (Вт/м·К).

Теплопроводность люминофорной композиции не превышает 0,05 Вт/м·К, поэтому отвод тепла в основном осуществляется через подложку на металлическое основание СИЭ. Потребляемая мощность кристалла составляет 29 мВт (прямое напряжение 2,9 В, прямой ток 10 мА). Производитель кристаллов указывает, что температура  $p$ – $n$ -перехода не должна превышать 125 °С. Основное тепло выделяется в активной области кристалла GaN со значением теплопроводности ~ 1,3 Вт/м·К, тепловой поток проходит от активной области через  $n$  тип и сапфировую подложку (теплопроводность 46 Вт/м·К), металлизацию и теплопроводящий клей на металлическое основание СИЭ. Рассчитанное теплового сопротивления кристалла ( $p$ – $n$ -переход – металлизация) по формуле (2) составляет 31 К/Вт. Теплопроводность клея составляет примерно 60 Вт/м·К, толщина клея не более 30 мкм, тепловое сопротивление СИЭ составит 33,87 К/Вт. По данным от производителя (фирма Engled) аналогичных СИЭ тепловое сопротивление их изделий составляет 45 К/Вт, что косвенно подтверждает достоверность проведённых оценочных расчётов.

По формуле (3) проведём расчёт температуры  $p$ – $n$ -перехода [9]:

$$T_{p-n} = T_{\text{окр}} + (R_t \cdot P_e), \quad (3)$$

где  $T_{p-n}$  – температура  $p$ – $n$ -перехода (°С);  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды (°С).

При  $T_{\text{окр}} = 25$  °С температура  $p$ – $n$ -перехода  $T_{p-n} = 25 + (33,87 \times 0,029) = 25,9$  °С.

Соответственно по формуле (3) определим значения температуры  $p$ – $n$ -перехода, которая составляет для варианта лампы с четырьмя СИЭ 102,7 °С.

Согласно методике [9] ускоренные испытания для определения срока службы светодиодов предусматривают форсирование, приводящее к интенсификации физико-химических процессов деградации светодиодов без изменения основных механизмов отказов.

$$K_y = \exp \left[ \left( \frac{E_a}{kT} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{p-n} + 273} \right) - \left( \frac{1}{T_{p-n y} + 273} \right) \right], \quad (4)$$

где  $K_y$  – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;  $E_a$  – энергия активации отказов, эВ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_{p-n}$  – температура  $p$ – $n$ -перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), °С;  $T_{p-n y}$  – температура  $p$ – $n$ -перехода в ускоренном режиме испытаний, °С.

Номинальное время наработки  $t_{ном}$  (срок службы СД) определяют по уравнению (5), задав коэффициент форсирования  $K_y$ , исходя из режимов ускоренных испытаний [9]:

$$T_{\text{ном}} = t_y \cdot k_y, \quad (5)$$

где  $t_y$  – время испытаний в ускоренном режиме.

Значение времени наработки в ускоренном режиме не должно быть меньше 1000 ч.

Построим график прогнозируемого срока службы для лампы с четырьмя СИЭ, значение энергии активации отказов для типовых светодиодов составляет примерно 0,75 эВ, данное значение будет использоваться для дальнейших расчётов (рис. 1). График построен в Ms Excel для заданных значений температур от 25 до 80°C и на основе формул (4), (5).

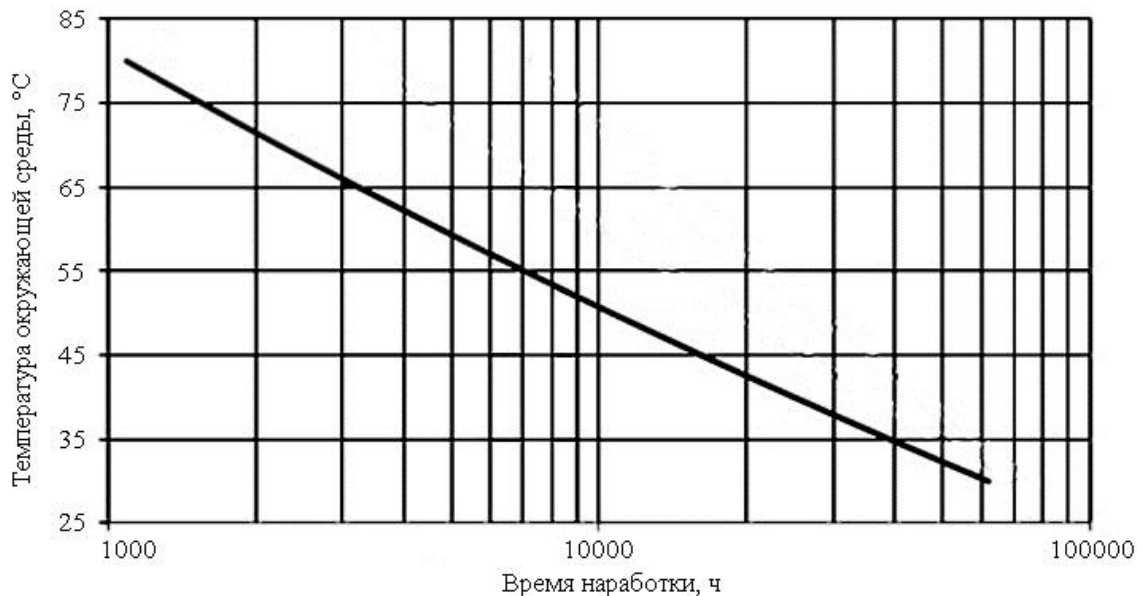


Рисунок 3 – Зависимость срока службы от температуры для лампы с четырьмя СИЭ

Из рис. 1 видно, срок службы светодиодной лампы превышает шестьдесят тысяч часов. Это соответствует мировому уровню разработок в данной области [10 – 11]. В расчётах не учитывался источник питания лампы (драйвер). С учётом источника питания, в частности электролитических конденсаторов, срок службы лампы может уменьшиться до 15 000 часов

### Заключение

В рамках данной работы проведены экспериментальные исследования структуры, состава и колориметрических параметров образцов люминофоров №1–№8. Наиболее близка по цветовым координатам к теплomu цвету получилась композиция №8.

Проведён расчёт срока службы светодиодной лампы в зависимости от температуры окружающей среды. Установлено, что срок службы светодиодной лампы превышает шестьдесят тысяч часов. Но в расчётах не учитывался источник питания лампы (драйвер). С учётом источника питания, в частности электролитических конденсаторов, срок службы лампы может уменьшиться до 15 000 часов.

### Литература

1. Социн Н.П. Новые люминофоры для эффективных приборов твердотельного освещения. Круглый стол производство светодиодов в россии — дорожная карта. Материалы доклада. Москва 2011. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://nprpss.ru/sobytiya/vystavki-i-konferencii/kruglyj-stol-proizvodstvo-svetodiodov-v-rossii-dorozhnaya-karta.html>, свободный (дата обращения: 15.06.2015)
2. Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy // Journal of Physics: Applied Physics. — 2010. — № 43.

3. Социн Н.П. Светодиод + порошок люминофор = новое качество света // Светодиоды и лазеры. — 2002. — №№1-2. — С.60-63.
4. Izotov S., Sitdikov A., Soldatkin V., Tuev V., Olisovets A. Study of phosphors for white LEDs // Procedia Technology. — 2014. — № 18. — P. 14–18.
5. Социн Н.П., Гальчина Н.А., Коган Л.М., Широков С.С., Юнович А.Э. Светодиоды «теплого» белого свечения на основе р-п-гетероструктур типа InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами из иттрий-гадолиниевых гранатов // ФТП. — 2009. — Т.43. — вып. 5. — С.700-704.
6. Вилисов А.А., Екимова И.А., Солдаткин В.С., Туев В.И. Люминофор для светодиода // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013». — 2013 — Т. 2. — С. 63-65.
7. Гончарова Ю.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность // Доклады ТУСУРа. — 2013. — № 2 (28). — С. 51–53.
8. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н., Олисовец А.Ю., Туев В.И. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУРа. — 2015. — №3. — С. 55-61.
9. ОСТ 11-336.938–83. Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/1057/info/23239>, свободный (дата обращения: 15.03.2016).
10. Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Доклады ТУСУРа. — 2011. — № 2(24), ч. 2. — С. 55–58.
11. Никифоров С.Г. Прогноз срока службы и изменения параметров промышленных светодиодов при наработке с помощью фотометрического метода // Инновации и инвестиции. — 2015. — №1. — С. 152–156.