

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМИ И СПЕКТРАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП БЕЛОГО СВЕЧЕНИЯ

А. Л. Гурский<sup>1\*</sup>, Н. В. Машедо<sup>1,2</sup>

УДК 535.33:628.981

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013, Минск, Беларусь; e-mail: gurskii@bsuir.by

<sup>2</sup> ОАО “Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции “БЕЛЛИС”, 220029, Минск, Беларусь; e-mail: mikalai@bellis.by

(Поступила 29 июня 2020)

На основе анализа результатов испытаний выборки светодиодных ламп белого свечения для общего освещения в процессе их старения установлена взаимосвязь между колориметрическими (коррелированная цветовая температура) и спектральными (соотношения интенсивностей спектральных полос излучения) параметрами ламп. С помощью деконволюции спектров излучения ламп показано, что изменение цветовой температуры обусловлено главным образом изменением соотношения между интенсивностью полосы 450 нм, обусловленной излучением диодной гетероструктуры, и длинноволновой составляющей неэлементарной желтой полосы излучения люминофора с максимумом 580 нм, а более коротковолновая составляющая с максимумом 530 нм проявляет себя главным образом в изменении общего светового потока. Возможной причиной изменения интенсивности спектральных составляющих неэлементарной полосы излучения люминофора могут быть как термические эффекты, так и структурные изменения в материале люминофора.

**Ключевые слова:** светодиодная лампа, спектр излучения, деконволюция, испытания, старение, люминофор, гетероструктура, белый светодиод, спектральная полоса.

*The interrelation between colorimetric (correlated color temperature) and spectral (intensity ratios of spectral emission bands) parameters of the white LED lamps for general lighting has been established based on the analysis of the test results of a set of lamps during aging. Using deconvolution of the lamp radiation spectra, it is shown that the change in color temperature is mainly due to a change in the intensity ratio of the 450 nm band origination from the diode heterostructure and the long-wavelength component of the non-elementary yellow band of the phosphor radiation with a maximum of 580 nm, while the shorter-wavelength component with a maximum of 530 nm manifests itself mainly in changing the total luminous flux. A possible cause of the change in the intensity of the spectral components of the non-elementary radiation band of the phosphor may be both thermal effects and structural changes in the phosphor material.*

**Keywords:** LED lamp, spectrum of radiation, deconvolution, testing, aging, phosphor, heterostructure, white LED, spectral band.

**Введение.** В настоящее время осветительные лампы на основе светодиодов белого свечения получают широкое распространение, постепенно вытесняя другие источники света. Это обусловлено рядом их преимуществ, в первую очередь высокой энергоэффективностью и экологичностью. В то же время эти источники света имеют ряд недостатков, в том числе изменение ряда параметров ламп (полного светового потока (TLF), коррелированной цветовой температуры (CCT) и т. д.) в процессе эксплуатации [1, 2]. В настоящее время большинство светодиодных ламп белого свечения реализуют

---

## INTERRELATION BETWEEN COLORIMETRIC AND SPECTRAL PARAMETERS OF THE WHITE LED LAMPS

A. L. Gurskii<sup>1\*</sup>, N. V. Mashedo<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup> Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, 220013, Belarus; e-mail: gurskii@bsuir.by; <sup>2</sup> JSC BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products, Minsk, 220029, Belarus; e-mail: mikalai@bellis.by)

чаще всего по бихроматической схеме, когда излучение в синей области, возникающее в диодной гетероструктуре, возбуждает широкую полосу излучения люминофора на основе, например, активированного алюмоиттриевого граната (YAG) в желтой области спектра [3, 4]. В процессе старения светодиодов происходят процессы, приводящие к изменению не только светового потока, но и соотношения интенсивностей спектральных полос излучения. Это в свою очередь вызывает изменение оттенка субъективно воспринимаемого цвета свечения: как правило, наблюдается более быстрое снижение интенсивности свечения люминофора по сравнению с излучением гетероструктуры [5], из-за чего более “теплое” свечение становится со временем все более “холодным”, что соответствует увеличению значения *ССТ*. Поэтому предлагаются методики оценки ресурса ламп по изменению этого параметра [6]. При описании этих процессов обычно оперируют только отношением интенсивностей полос излучения люминофора и гетероструктуры (отношение желтого к синему, *YBR*) [5—7], не принимая во внимание неэлементарный характер полосы излучения люминофора [8]. Информация о поведении составляющих неэлементарной полосы необходима для понимания природы физических процессов, приводящих к деградации люминофора, без чего невозможно улучшение его параметров, в том числе стойкости к деградации. Однако получение такой информации связано с трудностью выделения элементарных составляющих спектра свечения люминофора.

Цель данной работы — получение информации об изменении соотношения вкладов элементарных полос в общий спектр излучения светодиодных ламп в процессе их старения и о взаимосвязи изменений спектров излучения ламп с их колориметрическим параметром — коррелированной цветовой температурой. Такая информация может быть получена на основе деконволюции (разделения на составляющие полосы) регистрируемых спектров излучения ламп, привязанных к абсолютным значениям светового потока.

**Эксперимент.** Для экспериментов взяты выборки коммерческих светодиодных ламп фирм Philips с заявленной цветовой температурой  $T_d = 6500$  К, Arondie ( $T_d = 4000$  К) и OMRA ( $T_d = 3000$  К) Объем выборки определялся в соответствии с рекомендациями [9]. Испытания светодиодных ламп проводились с соблюдением требований [10—13] в режиме непрерывного горения в течение 6000 ч с промежуточным контролем через каждые 1000 ч, в режиме повышенной до 50 °С температуры окружающей среды в течение 1000 ч, а также в режиме коммутации напряжения питания: 70000 включений длительностью  $\tau = 10$  с либо 35000 включений длительностью  $\tau = 30$  с, с промежуточным контролем через каждые 10000 циклов, во втором случае последний интервал составлял 5000 циклов. Температура является весьма эффективным ускоряющим фактором процесса старения [14]. Однако при испытаниях ламп как конечных продуктов возможности ее повышения весьма ограничены, поскольку часть элементов конструкции ламп может быть повреждена при чрезмерном повышении температуры окружающей среды, а увеличение температуры за счет сильного прямого тока не может быть использовано из-за схемотехнических ограничений, предусмотренных конструкцией ламп. Поэтому для изучения влияния температуры последняя устанавливалась равной верхнему значению допустимого интервала рабочих температур. Исследования в режиме коммутации имели целью по возможности разделить влияние термических и электрических процессов. При выборе длительности включения учитывались данные [15], согласно которым установление теплового равновесия между диодной структурой и корпусом лампы происходит через ~20—30 с после подачи питания, в то время как полный прогрев ламп происходит за 2000—3000 с. Таким образом, 10-с включение обеспечивает полностью термически неравновесный режим, а 30-с — режим установления равновесия в системе диодная структура—корпус, при этом не происходит существенного разогрева лампы.

Установка для проведения ресурсных испытаний ламп включала в себя стабилизатор напряжения питания LIDER PS 5000SQ-CE, обеспечивающий точность стабилизации  $\pm 1\%$ , электропечь SNOL 58/350 с точностью стабилизации температуры  $\pm 1$  °С, реле времени Resanz RV 16 02 для установки требуемых временных интервалов включения ламп и параметров циклов коммутации, высокоточный цифровой мультиметр Metrahit 29S, обеспечивающий контроль напряжения питания с точностью  $\pm 0.1\%$ . Измерения параметров ламп проводились с использованием установки, в состав которой входили интегрирующая сфера IS1800 и двойной монохроматор-спектрометр IDR300 (Bentham Instruments Ltd.), позволявшие регистрировать спектры излучения с разрешающей способностью 0.1 нм и погрешностью регистрации амплитуды ~5 %, источник питания Extech 6720, измеритель мощности Yokogawa WT210, эталонная лампа TSRF-1800-250 W. Все оборудование имело актуальные свидетельства о калибровке. Методы измерений и обработки данных соответствовали рекомендациям [10, 16—18]. Для измерений каждый образец ламп устанавливался на специальный

держатель внутри интегрирующей сферы и выдерживался в течение как минимум 30 мин при номинальных параметрах электропитания. В контрольных точках проводились измерения значений  $TLF$ ,  $CCT$ , а также спектров излучения.

Для корректного определения зависимостей интенсивности спектральных полос требуется привязка спектральных данных к абсолютной шкале светового потока. Она осуществлялась путем интегрирования спектров, пересчитанных в шкалу энергий, и коррекции полученных интегральных значений до их соответствия значениям  $TLF$  путем домножения спектров на соответствующие поправочные коэффициенты.

Деконволюция спектров осуществлялась в два этапа. На первом этапе разложение на элементарные полосы проводилось методом Аленцева—Фока [19], который не требует никаких предварительных сведений о числе и форме полос. Пример с результатом выделения из общего спектра  $I$  одной из полос (“оранжевой” с максимумом в области 2.14 эВ, кривая 2) показан на рис. 1. Видно, что эта полоса очень хорошо аппроксимируется гауссовой кривой (кривая 3, погрешность определения интегральной интенсивности  $<0.2\%$ ). Остальная часть спектра (кривая 4) содержит “синюю” (2.755 эВ) и “зеленую” (2.34 эВ) полосы, при этом они также могут быть удовлетворительно аппроксимированы гауссовыми кривыми 5 и 6. Несмотря на некоторую асимметрию полосы 2.34 эВ, ошибка аппроксимации невелика, давая погрешность интегральной интенсивности полосы  $\sim 0.5\%$ . Наибольшая погрешность (5%) получается для полосы 2.775 эВ. Однако эта погрешность носит главным образом систематический характер и мало проявляется для зависимостей интегральной интенсивности от времени. С учетом этого после определения количества и формы полос в дальнейшем разделение спектров проводилось путем аппроксимации спектральной кривой тремя гауссовыми полосами по методу наименьших квадратов.

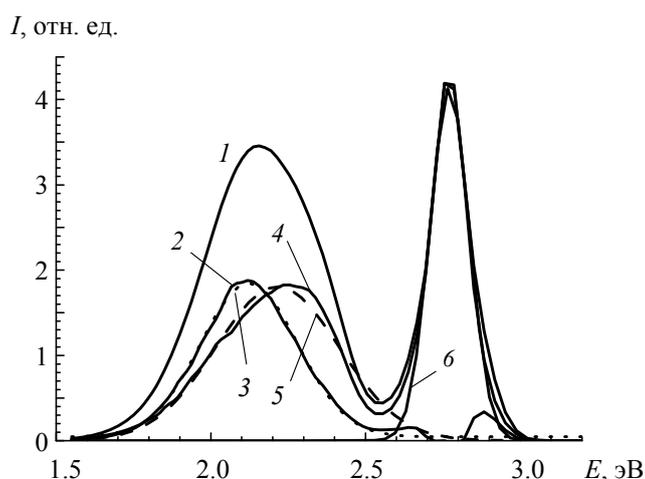


Рис. 1. Спектр излучения светодиодной лампы с  $T_d = 4000$  К (1), полоса 2.14 эВ, выделенная методом Аленцева—Фока (2), гауссова аппроксимация этой полосы (3), сумма полос 2.34 и 2.775 эВ (4), гауссова аппроксимация полос 2.34 (5) и 2.775 эВ (6)

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2 представлены зависимости  $TLF$  и  $CCT$  от времени  $t$  для ламп с  $T_d = 6500$  и  $3000$  К, полученные по результатам их испытаний в режиме непрерывного горения в течение 6000 ч. Видно, что падение светового потока сопровождается ростом  $CCT$ , при этом зависимости могут иметь немонотонный характер (хотя нельзя исключить случайный выброс) и отличаются для изученных типов ламп. В случае ламп с  $T_d = 3000$  К наблюдается обратная корреляция между значениями  $TLF$  и  $CCT$ , для ламп  $T_d = 6500$  К участку роста  $CCT$  предшествует довольно резкое уменьшение в течение первой 1000 ч. Влияние рассеивателя сводится к небольшому уменьшению как  $TLF$ , так и  $CCT$ , без изменения характера их временной зависимости для различных экземпляров ламп.

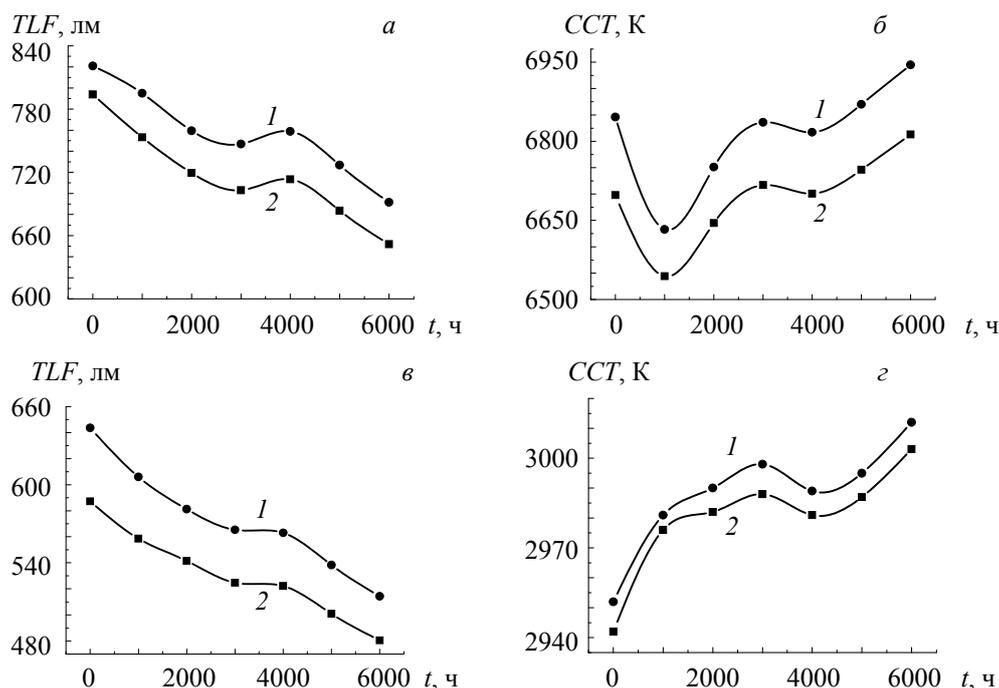


Рис. 2. Зависимости полного светового потока  $TLF$  ( $a, в$ ) и коррелированной цветовой температуры  $CCT$  ( $б, г$ ) от времени  $t$  для ламп с  $T_d = 6500$  ( $a, б$ ) и  $3000$  К ( $в, г$ );  $1$  — лампа без рассеивателя,  $2$  — с рассеивателем

На рис. 3,  $a, б$  показаны спектры излучения ламп с  $T_d = 6500$  и  $3000$  К, снятые в ходе испытаний в контрольных точках через каждые  $1000$  ч. Для ясности спектры расположены со смещением по вертикали вниз. Хорошо видна разница в соотношении интенсивностей синей (излучение гетероструктуры) и желтой полос (люминофор), определяющем значение  $CCT$ . На рис. 3,  $в, г$  показаны зависимости интенсивности отдельных спектральных полос, приведенные к их начальной интенсивности ( $t = 0$  ч) для сопоставления различий в их поведении. Зависимости для ламп без рассеивателя и с ним аналогичны, поэтому для примера показаны зависимости для ламп без рассеивателя.

Если учесть, что излучение люминофора (полосы  $2.14$  и  $2.34$  эВ) возбуждается излучением гетероструктуры ( $2.755$  эВ), то в отсутствие деградационных процессов в люминофоре зависимость нормированной интенсивности его свечения от времени наработки должна была бы повторять таковую для синей полосы  $2.775$  эВ. Однако из данных рис. 3,  $б, в$  можно заключить, что деградационные процессы имеют место не только в диодной гетероструктуре, но и в люминофоре, причем характер этих процессов различен для ламп разных производителей. В обоих случаях зависимость интенсивности зеленой полосы люминофора  $2.34$  эВ мало отличается от зависимости для возбуждающей полосы  $2.755$  эВ. Интенсивность же оранжевой полосы  $2.14$  эВ в случае ламп  $T_d = 3000$  К убывает в целом быстрее, чем интенсивность полосы  $2.755$  эВ (рис. 3,  $г$ ). В лампах с  $T_d = 6500$  К наблюдается вначале разгорание этой полосы, а затем также более быстрый спад ее интенсивности относительно интенсивности синей полосы. (рис. 3,  $в$ ). Такое поведение полос хорошо коррелирует с колориметрическими данными. Эта корреляция хорошо видна по разности между относительными интенсивностями полос  $\Delta I$  (рис. 3,  $д, е$ ).

Сравнение данных рис. 3,  $д, е$  с рис. 2,  $б, г$  показывает, что наилучшую корреляцию с  $CCT$  имеет разность между синей и оранжевой полосами, которая, очевидно, и вносит определяющий вклад в изменение  $CCT$  в процессе старения ламп. В лампах с  $T_d = 6500$  К зеленая полоса мало влияет на  $CCT$ , в лампах с  $T_d = 3000$  К этот вклад сопоставим, несмотря на значительно больший удельный вклад оранжевой полосы в общее излучение люминофора (см. рис. 3,  $a, б$ ).

Испытания при температуре  $+50$  °С в течение  $1000$  ч показали, что в этих условиях в лампах с  $T_d = 3000$  К происходит довольно быстрое (в течение первых  $250$  ч наработки) падение  $TLF$  на  $\sim 6\%$  с последующей его стабилизацией. При этом, как и в случае длительных испытаний при нормальной

температуре, наблюдается обратная корреляция между *TLF* и *ССТ*. Лампы с  $T_d = 6500$  К вначале могут даже увеличить интенсивность свечения в первые 250 ч, а затем начинается плавный ее спад. Процесс начального роста интенсивности по-разному выражен в разных экземплярах ламп. Какой-либо корреляции между временными зависимостями *TLF* и *ССТ* для этих ламп не наблюдалось. Анализ спектров излучения и интенсивностей отдельных спектральных полос показал, что в данном случае имеют место закономерности, сходные с описанными выше: наилучшим образом с зависимостью *ССТ* от времени коррелирует разность относительных интенсивностей синей и оранжевой полос.

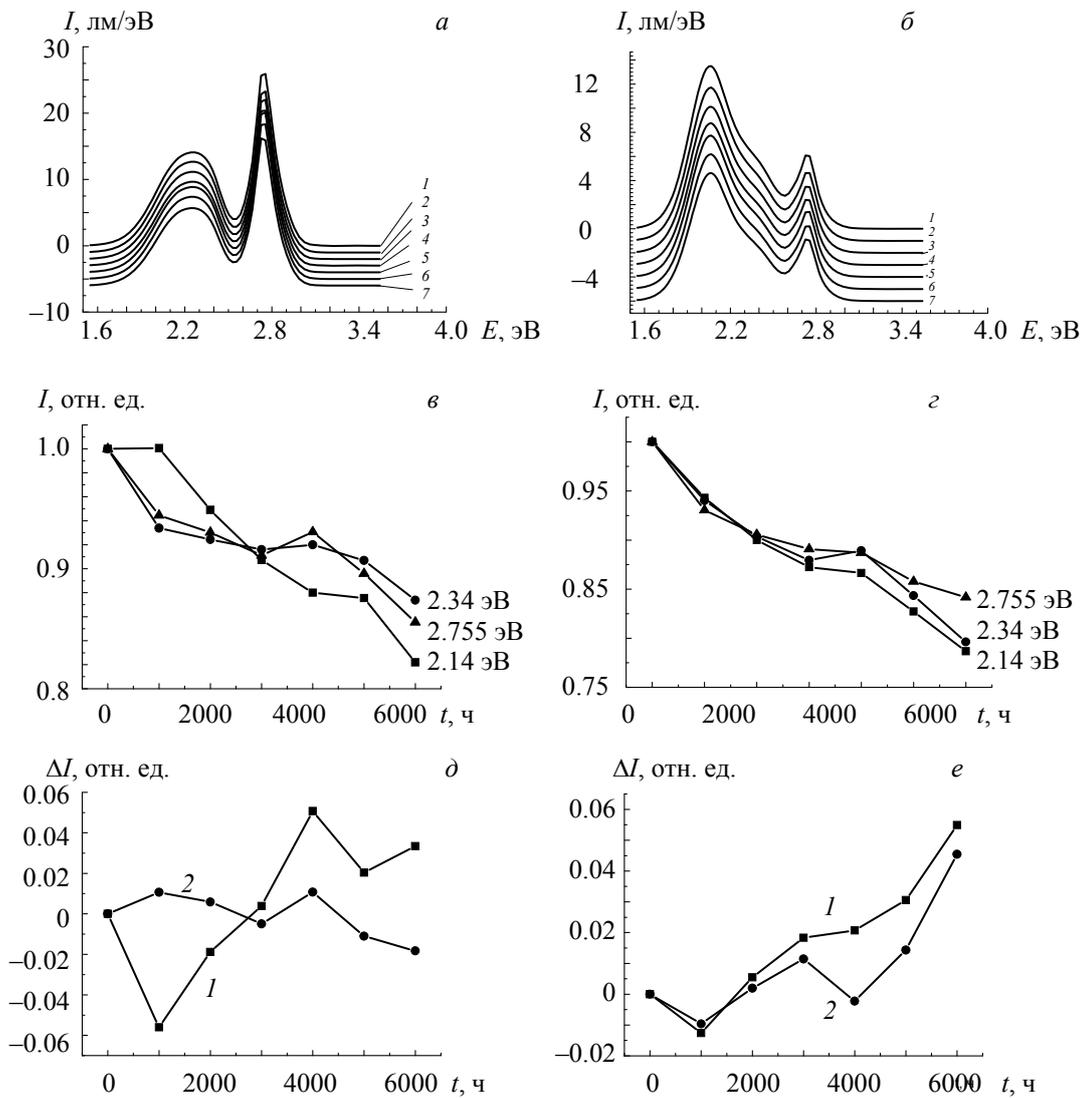


Рис. 3. Спектры излучения ламп, зарегистрированные в процессе испытаний в контрольных точках через каждые 1000 ч (а, б), зависимости от времени относительной интенсивности спектральных полос (в, г) и разности относительных интенсивностей между синей и оранжевой (1) и между синей и зеленой (2) полосами (д, е) для ламп с  $T_d = 6500$  (а, в, д) и 3000 К (б, г, е)

Результаты испытаний в режиме коммутации с  $\tau = 10$  и 30 с несколько отличаются от полученных в режиме непрерывного горения. На рис. 4 приведены зависимости *TLF* и *ССТ* для нескольких экземпляров ламп с  $T_d = 3000$  К от числа циклов коммутации  $N$ . В случае  $\tau = 10$  с зависимость для *TLF* сходна с таковой для случая кратковременных испытаний ламп при повышенной температуре. При этом происходит быстрое падение *TLF* в течение первых 10000 циклов, а затем в большинстве ламп наступает стабилизация (рис. 4, а). Следует отметить, что в некоторых лампах вместо стабилизации происходит возрастание *TLF*, в том числе до значений, превышающих исходное.

При  $\tau = 30$  с для всех образцов ламп наблюдалась немонотонная зависимость — вначале падение в течение первых 10000 циклов и затем рост практически до исходного значения (рис. 4, б). В целом зависимости от  $N$  сходны для разных  $\tau$  с учетом того, что в случае  $\tau = 30$  с число  $N$  вдвое меньше. Зависимости  $CCT$  от  $N$  для  $\tau = 10$  и 30 с приведены на рис. 4, в и г. Принимая во внимание степень точности получаемых данных, можно утверждать, что имеет место обратная корреляция между ходом зависимостей  $TLF$  и  $CCT$  от числа циклов коммутации  $N$ .

Разложение спектров излучения ламп на элементарные полосы показало, что и в этом случае с зависимостью  $CCT(N)$  в обоих случаях лучше всего коррелирует разность относительных интенсивностей синей полосы излучения гетероструктуры и оранжевой полосы излучения люминофора, тогда как поведение зеленой полосы излучения люминофора довольно нестабильно (рис. 4, д, е). Корреляция хорошо видна при сравнении рис. 4, в с кривой 1 на рис. 4, д, а также рис. 4, г с кривой 1 на рис. 4, е.

Из изложенного следует, что основная причина изменения  $CCT$  в процессе испытаний связана в первую очередь с процессами, происходящими в люминофоре, причем наибольший вклад дают процессы, приводящие к изменению интенсивности оранжевой полосы 2.14 эВ. Для выяснения причин

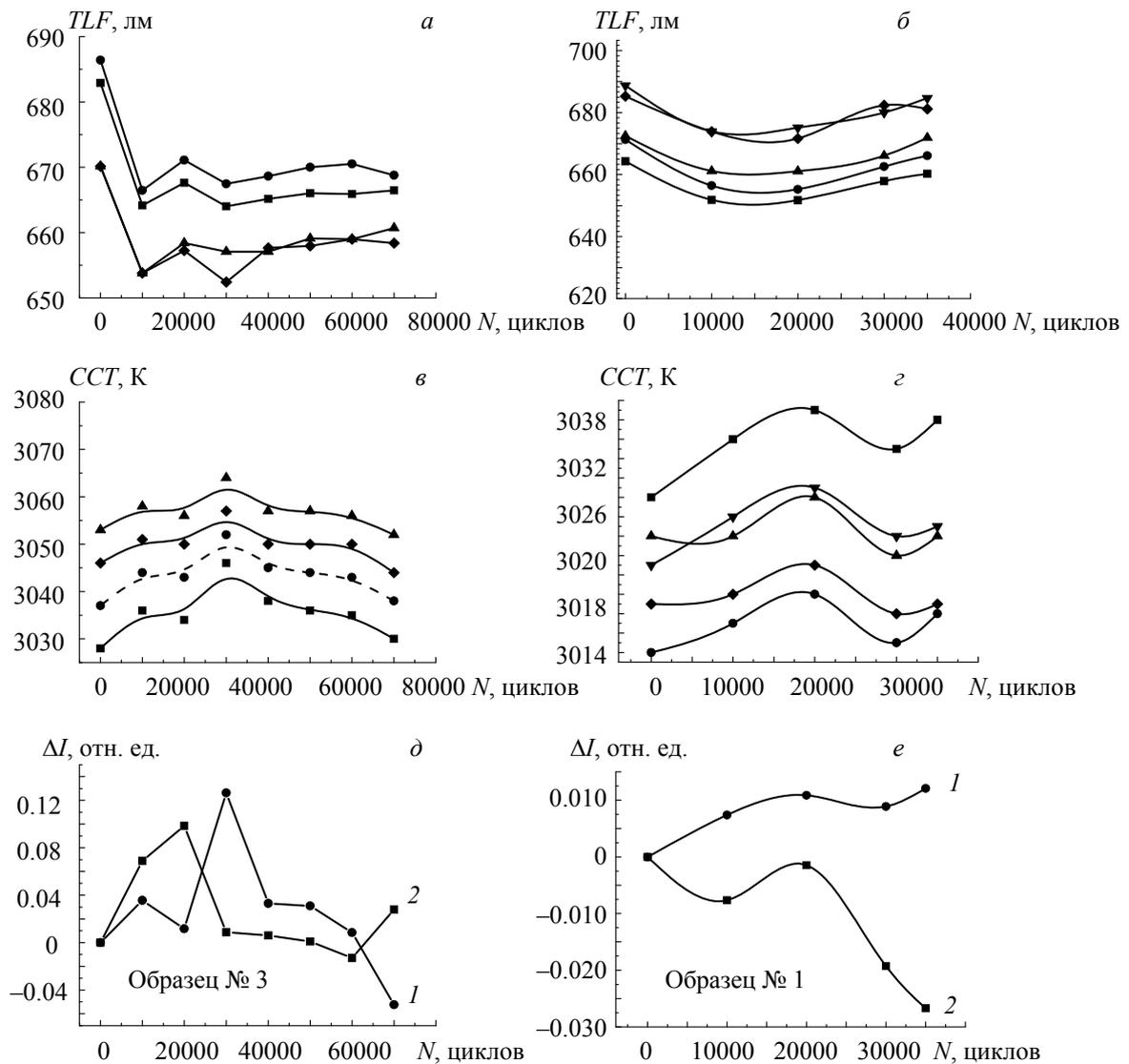


Рис. 4. Значения  $TLF$  (а, б) и  $CCT$  (в, г) для нескольких экземпляров ламп с  $T_d = 3000$  К и разности относительных интенсивностей между синей и оранжевой (1) и между синей и зеленой (2) спектральными полосами для одной из ламп (д, е) в зависимости от числа циклов коммутации  $N$ ; длительность включения ламп  $\tau$  в каждом цикле 10 (а, в, д) и 30 с (б, г, е)

различного поведения спектральных полос, формирующих общий спектр излучения люминофора, очевидно, требуется изучение процессов, происходящих в люминофоре при его старении. Однако материал люминофора коммерческих ламп точно неизвестен. Светодиодные лампы часто изготавливают с использованием хорошо отработанного люминофора на основе  $\text{YAG:Ce}^{3+}$ , позволяющего получать  $T_d$  от 3000 до 6000 К [20]. Согласно [21—24], происхождение полос 2.14 и 2.34 эВ связывают с излучательными рекомбинационными переходами между спин-орбитально расщепленными уровнями возбужденного состояния  $(5s^25p^6)5d^1$  и основным состоянием  $(5s^25p^6)4f^1$ , формируемым атомами активатора в широко применяемом люминофоре на основе  $\text{YAG:Ce}^{3+}$ . В этом случае полосы 2.34 и 2.14 эВ обусловлены переходами  ${}^2T_{2g}-2F_{5/2}$  и  ${}^2T_{2g}-2F_{7/2}$  [22]. Эти переходы соответствуют бесфононным линиям, а формирование широких полос происходит в результате интенсивного электрон-фононного взаимодействия, описываемого в рамках модели конфигурационных координат [23]. Однако физический механизм изменения соотношения интенсивностей этих полос в процессе испытаний ламп остается не вполне понятным.

В рамках вышеуказанного подхода для изменения соотношения интенсивностей полос требуется либо изменение соотношения заселенностей между расщепленными верхними уровнями, либо существенное изменение соотношения параметров электрон-фононного взаимодействия. Первый вариант может быть обусловлен термическими эффектами. Как видно из полученных данных, излучение гетероструктуры также ослабевает в процессе деградации. Это ослабление происходит за счет возрастания интенсивности безызлучательной рекомбинации, что в условиях стабильного потребляемого тока эквивалентно снижению к.п.д. и дополнительному нагреву структуры. Таким образом, снижение интенсивности свечения полосы 2.755 эВ означает повышение температуры чипа и, соответственно, люминофора, находящегося в непосредственной близости от него. Оно в свою очередь может приводить к температурному тушению излучения люминофора, более выраженному для длинноволновой полосы. В пользу такого предположения свидетельствует наличие обратной корреляции между  $TLF$  и  $ССТ$ . Изменение температуры излучающей области оценено по методике [25, 26] из формы коротковолнового крыла полосы 2.775 эВ. Эта оценка показала возрастание температуры излучающей области на 50 °С к концу срока испытаний при постоянном горении (6000 ч). Согласно [27], интенсивность свечения люминофора на основе  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  может уменьшиться на ~10 % при его нагреве от комнатной температуры до +150 °С. С учетом того что температура перехода в рабочем режиме лампы может составлять около +75 °С [15], дополнительный перегрев даст +135 °С, что может вызвать заметный эффект термического тушения. В [28] указано, что термическое тушение длинноволновой полосы люминофора на основе  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  происходит более эффективно. В пользу термической природы наблюдаемых процессов свидетельствуют и данные работы [29], где наблюдалось заметное изменение интенсивности излучения ламп и цветовых координат при изменении температуры окружающей среды в пределах интервала 50 °С. Второй вариант может быть связан с изменением структуры материала люминофора в процессе деградации.

На основе  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  довольно сложно получать лампы теплого свечения с  $T_d < 4000$  К. Для этих целей часто используются другие рецептуры люминофоров [8, 20, 30] либо смесь из нескольких (как правило, двух) люминофоров [30, 31]. Например, полоса 2.14 эВ может быть получена с использованием люминофора на основе соединения  $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)_3\text{SiO}_5:\text{Eu}^{2+}$  [8], поэтому для эффективного управления цветовой температурой может быть использована смесь люминофоров. В этом случае перераспределение интенсивностей спектральных полос может быть связано с изменениями свойств такой смеси. Для более точного установления причины изменения соотношения интенсивностей спектральных полос люминофоров требуются дополнительные исследования и точное знание состава применяемого люминофора.

**Заключение.** Изучение спектрального состава излучения светодиодных ламп белого свечения показало, что изменение цветовой температуры определяется главным образом изменением соотношения между интенсивностью полосы 450 нм (2.755 эВ), обусловленной излучением диодной гетероструктуры, и длинноволновой “оранжевой” составляющей неэлементарной желтой полосы излучения люминофора с максимумом 580 нм (2.14 эВ). Более коротковолновая “зеленая” составляющая с максимумом 530 нм (2.34 эВ) проявляется в основном в изменении общего светового потока. При этом, как правило, имеет место обратная корреляция между значениями светового потока и коррелированной цветовой температуры — при снижении первого вторая возрастает, и наоборот. Причиной изменения интенсивности спектральных составляющих неэлементарной полосы излучения люминофора

могут быть как термические эффекты, так и структурные изменения в материале люминофора, однако этот вопрос требует специального изучения.

- [1] **M. Meneghini, M. Dal Lago, N. Trivellin, G. Mura, M. Vanzi, G. Meneghesso, E. Zanoni.** *Microelectron. Reliability*, **52** (2012) 804—812
- [2] **M.-H. Chang, D. Das, P. V. Varde, M. Pecht.** *Microelectron. Reliability*, **52** (2012) 762—782
- [3] **М. Л. Бадгутдинов, Е. В. Коробов, Ф.А. Лукьянов, А. Э. Юнович, Л. М. Коган, Н. А. Гальчина, И. Т. Рассохин, Н. П. Социн.** *ФТП*, **40** (2006) 758—763
- [4] **Ф. Е. Шуберт.** *Светодиоды*, пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича, Москва, Физматлит (2008) 417—424 [**F. E. Schubert.** *Light-Emitting Diodes*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK (2006)]
- [5] **T. K. Law, F. Lim.** *IEEE Photon. J.*, **10** (2018) 820414
- [6] **J. Fan, M. C. Mohamed, C. Quian, X. Fan, G. Zhang, M. Pecht.** *Materials*, **10** (2017) 819
- [7] **J. Xiao, Z. Guo, Y. Xiao, Y. Gao, L. Zhu, Y. Lin, Y. Lu, Z. Chen.** *IEEE Photon. J.*, **9** (2017) 8200911
- [8] **G. Li, Y. Tian, Y. Zhao, J. Lin.** *Chem. Soc. Rev.*, **44** (2015) 8688—8713
- [9] IES TM-28-14. Illuminating Engineering Society of North America (2011)
- [10] IEC 62612:2013. Geneva, IEC (2013)
- [11] IEC 62506:2013. Geneva, IEC (2013)
- [12] IEC TS 62861:2017. Geneva, IEC (2017)
- [13] IES TM-21-11. Illuminating Engineering Society of North America (2011)
- [14] **M. Meneghini, M. Dal Lago, N. Trivellin, G. Meneghesso, E. Zanoni.** *IEEE Transact. Industry Appl.*, **50** (2014) 78—85
- [15] **M. Cai, D. Yang, K. Tian, W. Chen, X. Chen, P. Zhang, X. Fan, G. Zhang.** *Appl. Therm. Eng.*, **95** (2016) 482—490
- [16] IEC 60081:2007 + A1:2000 + A2:2003 + A3:2005 + A4:2010 + A5:2013. Geneva, IEC (2013) 191
- [17] Commission Regulation (EU) No. 1194/2012 of 12 December 2012 Implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Directional Lamps, Light emitting diode lamps and related equipment. Official J. Europ. Union (2012) 342
- [18] Commission Regulation (EC) No 244/2009 of 18 March 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Non-directional Household Lamps, Official J. Europ. Union (2009) 76
- [19] **М. В. Фок.** *Тр. ФИАН*, **59** (1972) 3—24
- [20] **A. Lakshmanan.** *Luminescence and Display Phosphors: Phenomena and Applications*, New York, Nova Science Publishers, Inc. (2008) 131—132
- [21] **V. Bachmann, C. Ronda, A. Meijerink.** *Chem. Mater.*, **21** (2009) 2077—2084
- [22] **D. J. Robbins.** *J. Electrochem. Soc.: Solid State Sci. Technol.*, **126** (1979) 1550—1555
- [23] **K. V. Ivanovskikh, J. M. Ogieglo, A. Zych, C. R. Ronda, A. Meijerink.** *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **2** (2013) R3148—R3152
- [24] **T.-H. Yang, H.-Y. Huang, C.-C. Sun, B. Glorieux, X.-H. Lee, Y.-W. Yu, T. Y. Chung.** *Sci. Rep.*, **8** (2018) 296
- [25] **Р. Балтрамеюнас, А. Жукаускас, Г. Тамулайтис.** *ЖЭТФ*, **91** (1986) 1909—1916
- [26] **Z. Vaitonis, P. Vitta, A. Zukauskas.** *J. Appl. Phys.*, **103** (2008) 093110
- [27] **H.-J. Li, Q.-Y. Shao, Y. Dong, J.-Q. Jiang, C. Liang, J.-H. He.** *Chin. J. Lumin.*, **29** (2008) 984—988
- [28] **D. P. Dutta, A. K. Tyagi.** *Solid State Phenom.*, **155** (2009) 113—143
- [29] **P. Tabaka, P. Rozga.** *Photon. Lett. Poland*, **11** (2019) 112—114
- [30] **X. Li, J. D. Budai, F. Liu, J. Y. Howe, J. Zhang, X.-J. Wang, Z. Gu, C. Sun, R. S. Meltzer, Z. Pan.** *Light: Sci. Appl.*, **2** (2013) 50
- [31] **S.-P. Ying, H.-K. Fu, H.-H. Hsieh, H.-W. Kuo.** *IEEE Transact. Electron Devices*, **64** (2017) 1088—1093