

кристалл, тем самым существенно изменяя состав расплава вблизи ФК и, таким образом, являясь потенциальной причиной начала дендритного роста. Достоверность результатов расчетов проверена на ряде тестов, в которых анализировалось влияние тепломассопереноса на форму ФК при скоростях охлаждения кассеты, соответствующих данным процессов по выращиванию поликристаллов теллурида висмута.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на вычислительной базе ИПМех РАН (тема № АААА-А20-120011690136-2) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00036).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Кристаллическая пластина, прямоугольный брусок, компонент для производства термоэлектрических модулей и способ получения кристаллической пластины / Ю.М. Белов [и др.] // Патент РФ. – 2010. № 2402111. – 15 с.
2. Study of the Bi-Sb-Te ternary phase diagram / T. Caillat [et al.] // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1992. – V. 53, № 2. – P. 227–232.
3. Простомолотов, А.И. Дистанционное и сопряженное моделирование тепломассопереноса и дефектообразования в технологических процессах / А.И. Простомолотов, Н.А. Вереzub, Х.Х. Ильясов // Изв. ВУЗов. МЭТ. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 31–36.

РОЛЬ ЭФФЕКТА ПЕРЕГРЕВА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ В ПРОЦЕССАХ СТАРЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ БЕЛОГО СВЕЧЕНИЯ

А. Л. Гурский¹, Н. В. Машедо²

¹⁾ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: gurskii@bsuir.by*

²⁾ *ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС»,
ул. Красная, 8, 220029 Минск, Беларусь,
e-mail: mikalai@bellis.by*

На основе определения температуры активной области по форме коротковолнового крыла спектров излучения диодной гетероструктуры оценено возрастание перегрева активной области с течением времени в процессе старения светодиодов белого свечения. Показано, что величина перегрева увеличивается примерно на 50 °С в течение 6000 ч наработки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наблюдаемые изменения колориметрических и спектральных параметров излучения светодиодов могут быть объяснены эффектами, вызванными возрастанием перегрева активной области гетероструктуры за счет увеличения вклада процессов безызлучательной рекомбинации.

Ключевые слова: светодиод; активная область; люминофор; спектр; перегрев; деградация; старение; безызлучательная рекомбинация.

THE ROLE OF ACTIVE REGION OVERHEATING IN THE AGEING PROCESSES OF WHITE LIGHT EMITTING DIODES

A. L. Gurskii¹, M. V. Masheda²

¹⁾ *Belarusian state university of informatics and radioelectronics, P. Brovka str. 6,
220013 Minsk, Belarus,*

²⁾ *BELLIS Testing and Certification of Home Appliances and Industrial Products,
Krasnaja str. 8, 220029 Minsk, Belarus*

Corresponding author: A. L. Gurskii (gurskii@bsuir.by)

Based on the determining temperature of the active region from the shape of short-wave wings of radiation spectra of diode heterostructure, the increase of the overheating of active region with increasing time during ageing of white LEDs was estimated. It is demonstrated that the overheating value increases approximately by 50 °C after 6000 h of operation. The obtained results indicate that the observed changes of the colorimetric and spectral parameters of the LED radiation can be explained by the effects caused by an increase of the overheating of active region of heterostructure due to increasing contribution of the non-radiative recombination processes.

Key words: light emitting diode; active region; phosphor; spectrum; overheating; degradation; ageing; non-radiative recombination.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получают полупроводниковые источники света на основе светоизлучающих диодов белого свечения. Такие источники в виде светильников все шире применяются в светотехнике для целей освещения. Источники света со специальным спектральным составом (фитолампы и т.п.) также находят все более широкую сферу применения, например, в сельском хозяйстве. Одной из актуальных задач является обеспечение соответствия их технических параметров, в частности, спектральных характеристик, установленным требованиям, включая требования по качеству цветопередачи при освещении предметов подобными источниками света, а также по стабильности спектра излучения. Вместе с тем известно, что в процессе наработки происходит изменение колориметрических (цветовая температура, координаты цветности) параметров излучения [1, 2], которые, в свою очередь, определяются его спектральными параметрами. Как правило, в процессе старения диодов наряду с общим падением интенсивности свечения происходит изменение цвета свечения в сторону более «холодного» оттенка. Обычно при рассмотрении этих процессов в светодиодах, выполненных по бихроматической схеме [3], оперируют соотношением интенсивностей излучения гетероструктуры на основе GaN (полоса излучения в синей области) и люминофора, например, на основе YAG:Ce³⁺ (полоса излучения в желтой области) [4], при этом обычно не учитывают неэлементарный характер последней. Ранее путем деконволюции спектров излучения было установлено, что в процессе испытаний выборки светодиодов в течение 6000 ч зависимости интенсивности свечения полос излучения гетероструктуры и двух полос излучения люминофора от времени отличаются между собой [5]. При этом более длинноволновая полоса излучения люминофора с максимумом в районе 2,14 эВ затухает примерно по тому же закону, как и полоса излучения гетерострук-

туры (2,755 эВ), а более коротковолновая с максимумом в районе 2,34 эВ демонстрирует нестабильное поведение. Цель данной работы – получение информации о роли термических эффектов в процессах уменьшения интенсивности свечения различных спектральных полос с течением времени.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах использовались выборки коммерческих светодиодных ламп фирм Philips с заявленной цветовой температурой T_c равной 6500 K, Agondie ($T_c=4000$ K) и OMRA ($T_c=3000$ K) Установка для ресурсных испытаний ламп содержала стабилизатор напряжения питания LIDER PS 5000SQ CE, с точностью стабилизации $\pm 1\%$, электропечь SNOL 58/350 с точностью стабилизации температуры $\pm 1^\circ\text{C}$, реле времени Resanz RV 16 02 для установки требуемых временных интервалов включения ламп и параметров циклов коммутации, высокоточный цифровой мультиметр Metrahit 29S, для контроля напряжения питания с точностью $\pm 0,1\%$. Измерения параметров ламп проводились на установке, куда входили интегрирующая сфера IS1800 фирмы Benthams Instruments Ltd. а также двойной монохроматор-спектрорадиометр IDR300 вышеуказанной фирмы, позволявшие регистрировать спектры излучения с разрешающей способностью 0,1 нм и погрешностью регистрации амплитуды порядка 5%, источник питания Extech 6720, измеритель мощности Yokogawa WT210, эталонная лампа TSRF-1800-250 W. Методы измерений и обработки данных соответствовали рекомендациям соответствующих международных стандартов. Перед проведением измерений образцы ламп устанавливались на специальный держатель внутри интегрирующей сферы и выдерживались в течение времени не менее 30 мин при номинальных параметрах электропитания. В контрольных точках через каждые 1000 ч наработки производились измерения значений полного светового потока TLF, коррелированной цветовой температуры CCT, а также спектров излучения.

Для определения зависимостей интенсивности спектральных полос от времени проводилась 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, полученным из фотометрических измерений, путем домножения спектров на соответствующие поправочные коэффициенты. Разделение спектров на составляющие полосы производилось методом Аленцева-Фока [6], показавшим, что в шкале энергий кванта форма спектральных полос близка к гауссовой, а расхождение интегральной интенсивности гауссовых полос по сравнению с данными метода Аленцева-Фока не превышает 3–5%. Это позволило в дальнейшем использовать более производительный метод программного выделения из спектров полос гауссовой формы.

Определение температуры перегрева активной области производилось с помощью методики, описанной в [7]. Поскольку оценивалась разность нагрева, то исключается систематическая погрешность оценки температуры этим методом. Кроме этого, в случае гетероструктур нет погрешности формы спектра, связанной с реабсорбцией излучения, в силу эффекта широкозонного окна [8]. Оценка температуры дается формулой:

$$T_j \approx - \frac{\Delta E}{k_B \left(\Delta E \frac{\partial}{\partial E} (\ln I(E)) - \frac{1}{2} \right)},$$

где T_j – характеристическая температура, значение которой близко к температуре перехода, k_B – постоянная Больцмана, $\frac{\partial}{\partial E} (\ln I(E))$ – производная от логарифма спектральной функции в одной из точек на высокоэнергетическом крыле, где функция $\ln I(E)$ имеет линейный участок, ΔE – разность энергий между точкой максимума полосы излучения и точкой, в которой бралась производная.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, *a* приведены спектры излучения одного из образцов светодиодных ламп, снятые в различных контрольных точках, а на рис. 1, *б* – зависимости относительной интенсивности различных спектральных полос от времени в сопоставимых единицах. Форма полосы свечения люминофора на рис. 1, *a* связана с ее неэлементарностью, включающей как минимум две составляющие с максимумами в районе 2,14 и 2,34 эВ. Наличие этих максимумов связывают в литературе с излучательными переходами между спин-орбитально расщепленными уровням возбужденного состояния ($5s^25p^6$) $5d^1$ и основным состоянием ($5s^25p^6$) $4f^1$, формируемых атомами активатора в люминофоре на основе YAG:Ce³⁺ [9]. В этом случае полосы 2,34 эВ и 2,14 эВ соответствуют переходам $^2T_{2g} - 2F_{5/2}$ и $^2T_{2g} - 2F_{7/2}$ соответственно [10]. Эти переходы соответствуют бесфононным линиям, а формирование широких полос происходит в результате интенсивного электрон-фононного взаимодействия, описываемого в рамках модели конфигурационных координат [11].

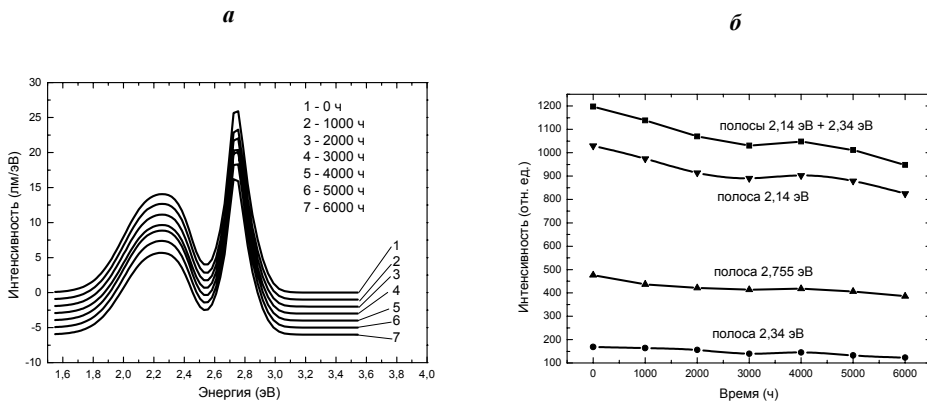


Рисунок 1. – Спектры излучения светодиодной лампы с $T_c = 6500$ К, снятые в процессе испытаний в контрольных точках через каждые 1000 ч (а); зависимости относительной интенсивности спектральных полос от времени (б)

В рамках вышеуказанного подхода для объяснения изменения соотношения интенсивностей полос 2,14 эВ и 2,34 эВ, и увеличения экспериментальных значений цветовой температуры от 6550 К до 6950 К, обнаруженного в [5], требуется либо изменение соотношения заселенностей между расщепленными верхними уровнями,

либо существенное изменение соотношения параметров электрон-фононного взаимодействия. Более вероятным представляется первый вариант, который может быть обусловлен термическими эффектами. Как видно из рис. 1, б, излучение гетероструктуры также ослабевает в процессе деградации. Это ослабление в условиях стабильного потребляемого тока может происходить только за счет возрастания интенсивности безызлучательной рекомбинации, что 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.

На рис. 2, а приведены фрагменты коротковолнового крыла спектральной функции излучения гетероструктуры с максимумом 2,775 эВ, использовавшиеся для определения величины перегрева активной области, а на рис. 2, б – результаты расчета увеличения температуры активной области гетероструктуры ΔT с течением времени. В начале испытаний принято $\Delta T = 0$. Видно, что к концу срока испытаний при постоянном горении (6000 ч) происходит увеличение температуры перехода примерно на 50 °С.

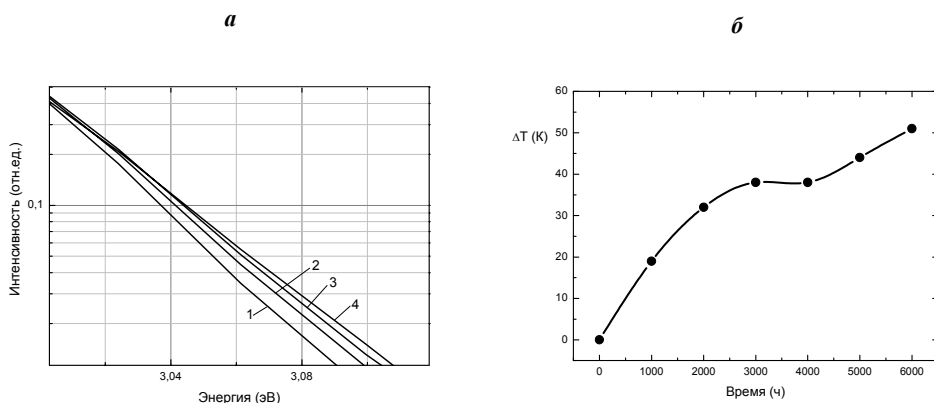


Рисунок 2. – Фрагменты коротковолнового крыла спектров излучения гетероструктуры, снятых: 1 – в начале испытаний, 2 – через 1000 ч, 3 – через 2000 ч, 4 – через 6000 ч (а); зависимость возрастания температуры перехода ΔT от времени (б)

Из сравнения рис. 1, б и рис. 2, б видна хорошая корреляция между характером зависимостей интенсивности спектральных полос от времени и функцией, описывающей увеличение ΔT со временем.

По данным [12], интенсивность свечения люминофора на основе YAG:Ce^{3+} может уменьшиться примерно на 10% при его нагреве от комнатной температуры до +150 °С. Температура перехода в рабочем режиме лампы может составлять величину около +75 °С [13] и более, поэтому дополнительный перегрев даст величину как минимум +135 °С, что может вызвать ощутимый эффект термического тушения излучения люминофора. Отметим, что экспериментально измеряемые температуры люминофора белых светодиодов могут варьироваться в диапазоне от 50 °С до 275 °С [9]. В [14] указано на более высокую эффективность термического тушения длинноволновой полосы люминофора на основе YAG:Ce^{3+} , что находится в соответствии с по-

лученными нами данными. В пользу термической природы наблюдаемых процессов свидетельствуют и данные работы [15], где наблюдалось заметное изменение интенсивности излучения ламп и цветовых координат при изменении температуры окружающей среды в пределах интервала 50 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наблюдаемые закономерности увеличения цветовой температуры и изменения соотношения интенсивности спектральных полос излучения гетероструктуры и люминофора в процессе эксплуатации светодиодных ламп белого свечения можно объяснить на основе термического эффекта, связанного с возрастанием температуры активной области излучающей диодной гетероструктуры из-за ее деградации. Деградация приводит к увеличению концентрации центров безызлучательной рекомбинации, что при постоянном потребляемом токе означает снижение к.п.д. диода и рост выделения тепла. Это приводит к уменьшению интенсивности свечения в области 2,755 эВ. Поскольку именно это излучение является возбуждающим для люминофора, происходит также снижение интенсивности свечения люминофора. Однако это снижение происходит в большей степени, чем уменьшение интенсивности свечения гетероструктуры, что обуславливает повышение цветовой температуры (смещение ощущения цвета к более «холодному» оттенку). Последний эффект может быть вызван, как показывают оценки, возрастанием вклада процессов термического тушения люминесценции в материале люминофора при нагреве диодной структуры. Соответственно, возможно объяснение наблюдаемых процессов только на основе термического эффекта, без привлечения каких-либо иных механизмов. Очевидно, для устранения такого эффекта необходимо увеличение стойкости активной области излучающей гетероструктуры к процессам генерации безызлучательных центров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Light emitting diodes reliability review / M.-H. Chang [et al.] // *Microelectronics Reliability*. – 2012. – V. 52. P. 762–782.
2. Chip and package-related degradation of high power white LEDs / M. Meneghini [et al.] // *Microelectronics Reliability* – 2012. – V. 52. –P. 804–812.
3. Шуберт, Ф. Светодиоды. Пер. с англ. / под ред. А. Э. Юновича. 2-е изд. /Ф. Шуберт. – М.: Физматлит, 2008. – С. 417–424.
4. Color shift failure prediction for phosphor-converted white LEDs by modeling features of spectral power distribution with a nonlinear filter approach / J. Fan [et al.] // *Materials*. – 2017. – V. 7, № 10. –P. 819.
5. Gurskii, A.L. Color and spectral characteristics of white light emitting diodes and their variation during aging / A. L. Gurskii, M. V. Masheda // Доклады БГУИР. – 2019. – №. 7(125). – P. 39–45.
6. Фок, М. В. Разделение сложных спектров на индивидуальные полосы с использованием обобщенного метода Аленцева / М. В. Фок // Труды ФИАН. – 1972. – Т. 59, № 2. – С. 3–24.
7. Балтрамеюнас, Р. Спектроскопия возбуждения электронно-дырочной плазмы в монокристаллах селенида кадмия: горячие электроны и фононы / Р. Балтрамеюнас, А. Жукаускас, Г. Тамулайтис. // ЖЭТФ. – 1986. – Т. 91, №. 5. – С. 1909–1916.
8. Алферов, Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж. И. Алферов // ФТП. – 1998. – Т. 32, № 1. – С. 3–18.
9. Noncontact and instant detection of phosphor temperature in phosphor-converted white LEDs / T.-H. Yang [et al.] // *Scientific Reports*. – 2018. – V. 8. – P. 296 (11pp).
10. Robbins, D. J. The Effects of Crystal Field and Temperature on the Photoluminescence Excitation Efficiency of Ce³⁺ in YAG / D. J. Robbins // *J. Electrochem. Soc.: Solid State Science and Technology*. – 1979. – V. 126, № 9. – P. 1550–1555.

11. Luminescence Temperature Quenching for Ce^{3+} and Pr^{3+} d-f Emission in YAG and LuAGK / V. Ivanovskikh [et al.] // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – 2013. – V. 2, № 2. – P. R3148–R3152.
12. The thermal quenching of YAG:Ce³⁺ phosphors for white LED application / H.-J Li [et al.] // Chinese Journal of Luminescence. – 2008. – V. 29, № 6. – P. 984–988.
13. Thermal degradation kinetics of LED lamps in step-up-stress and step-down-stress accelerated degradation testing / M. Cai [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 95. – P. 482–490.
14. Dutta, D.P. Inorganic Phosphor Materials for Solid State White Light Generation /D.P. Dutta, A. K. Tyagi // Solid State Phenomena. – 2009. – V. 155. – P. 113–143.
15. Tabaka, P. The light color quality of LEDs operating at winter temperatures /P. Tabaka, P. Rozga. // Photonics letters of Poland. – 2019. – V. 11, №4. – P. 112–114.

ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

А. Л. Долгий, Н. С. Писаренко, В. П. Бондаренко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: vitya51@mail.ru*

Электрохимическим анодированием в растворе фтористоводородной кислоты на поверхности монокристаллических кремниевых пластин были сформированы буферные слои пористого кремния, которые состояли из двух субслоев с различной пористостью и толщиной. Первый поверхностный слой имел толщину 0,5 мкм и низкую пористость 30–40 %, а второй слой имел пористость 55–60 % и толщину 5 мкм. Методами атомно-слоевой и молекулярно-лучевой эпитаксии на поверхности пористого кремния были сформированы слои нитрида галлия. Перед эпитаксией был проведен отжиг в атмосфере водорода для спекания пористого кремния. Для изучения структуры полученных гетероэпитаксиальных структур были использованы сканирующая электронная микроскопия и рентгеновский анализ. Установлены особенности образования и роста слоев нитрида галлия и влияния на их структуру параметров буферных слоев пористого кремния и режимов отжига. Показано, что комбинация атомно-слоевой и молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получить гетероэпитаксиальные структуры нитрида галлия приборного качества на кремниевых подложках.

Ключевые слова: пористый кремний; нитрид галлия; атомно-слоевая эпитаксия; молекулярно-лучевая эпитаксия.