

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

А. Л. Гурский¹, Н. В. Машедо², В. Н. Павловский³

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*

³) *Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости, 68, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: v.pavlovskii@ifanbel.bas-net.by*

При оптическом возбуждении излучателей светодиодных ламп в интервале температур от 25 °С до 150 °С с ростом температуры происходит линейный сдвиг максимума полосы излучения гетероструктур в длинноволновую область со скоростью 0,38 мэВ/К, а максимум полосы излучения люминофора сдвигается в сторону коротких волн со скоростью 0,27 мэВ/К. Оценка температуры электронной подсистемы по форме коротковолнового крыла спектра излучения гетероструктуры соответствует температуре образцов. Форма коротковолнового крыла спектра излучения гетероструктуры указывает на возможность замедления процессов релаксации фотовозбужденных электронов в гетероструктуре. Интенсивность излучения образцов стабильна во всем температурном интервале, в отличие от электрического возбуждения, что обусловлено прямым оптическим возбуждением люминофора излучением лазера.

Ключевые слова: спектр; люминесценция; светодиод белого свечения; оптическое возбуждение; температура.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF LUMINESCENCE SPECTRA OF EMITTERS OF LED LAMPS AT OPTICAL EXCITATION

A. L. Gurskii¹, M. V. Masheda², V. N. Pavlovskii³

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*

³) *Institute of Physics of NAS of Belarus, Nezavisimosti ave. 68, 220072 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. L. Gurskii (gurskii@bsuir.by)*

When the emitters of LED lamps are optically excited in the temperature range from 25 °С to 150 °С, with increasing temperature, the maximum of the emission band of heterostructures shifts linearly to the long-wave region at a rate of 0,38 meV/K, and the maximum of the phosphor emission band shifts to the short waves at a rate of 0,27 meV/K. The estimation of the temperature of the electronic subsystem by the shape of the short-wave wing of the radiation spectrum of the heterostructure corresponds to the temperature of the samples. The shape of the short-wave wing of the radiation spectrum of the heterostructure indicates the possibility of slowing down the relaxation processes of photoex-

cited electrons in the heterostructure. The radiation intensity of the samples is stable throughout the temperature range, in contrast to the electrical excitation, which is due to the direct optical excitation of the phosphor by laser radiation.

Key words: spectrum; luminescence; white LED; optical excitation; temperature.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с процессами деградации излучателей светодиодных ламп белого свечения не теряют своей актуальности, что связано с широким распространением полупроводниковых источников освещения. Ранее нами было показано, что значительную роль в процессах деградации излучателей светодиодных ламп играют термические эффекты [1, 2]. Протекающие при этом процессы изучены недостаточно. Для их изучения целесообразно проведение исследований в условиях разделения вклада электрических и оптических процессов в излучателях. Цель данной работы – получение информации о зависимости спектров свечения светодиодов белого свечения от температуры при оптическом возбуждении, когда исключены эффекты, связанные с электровозбуждением (электрическое поле, джоулев нагрев, электромиграция и т.д.).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах использовались светодиодные излучатели белого свечения, смонтированные на алюминиевых теплоотводящих пластинах, извлеченные из коммерческих светодиодных ламп с заявленной цветовой температурой 3000 К. Образцы крепились прижимами к горизонтальной площадке нагревателя паяльной станции Weller WT1 с применением термопасты КПТ-8 между теплоотводящей пластиной и площадкой. Измерения проводились при фиксированных температурах 25 °С, 50 °С, 70 °С, 90 °С, 110 °С, 130 °С и 150 °С. Контроль температуры осуществлялся с помощью термодпары и измерителя температуры НН309А, при этом точность установки температуры была не хуже $\pm 2^\circ\text{C}$. Оптическое возбуждение образцов осуществлялось с помощью лазера Sony SLD3134VL (длина волны $\lambda = 406$ нм, выходная оптическая мощность – 8 мВт). Питание лазера осуществлялось от источника Б5-71/2 МС ($U \sim 5$ В, $I = 0,03$ А). Оценочная интенсивность возбуждения составляла 4 Вт/см². Интенсивность излучения контролировалась с помощью измерителя мощности излучения Thorlabs PM100D с регистрирующей головкой Thorlabs S142C. Спектры излучения с поверхности образца регистрировались с использованием волоконного световода, из которого излучение передавалось на входную щель спектрометра SDH-IV производства компании Солар ЛС (г. Минск). После цикла измерений с нагревом образцов до 150 °С производилось их охлаждение до 25 °С и повторное измерение спектров и интенсивности излучения светодиодов для контроля обратимости происходящих изменений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, а представлены спектры фотолюминесценции светодиода с люминофором при лазерном возбуждении для различных температур. Спектры состоят из коротковолновой полосы в районе 2,7 эВ, соответствующей излучению полупроводниковой светодиодной гетероструктуры, и неэлементарной полосы с максимумом в районе 2,05 эВ, соответствующей излучению люминофора. Кроме полосы с максимумом в районе 2,05 эВ, видна также полоса с максимумом в районе 2,4 эВ.

На рис. 1, б приведена коротковолновая часть этих спектров, соответствующая полосе излучения гетероструктуры. На них, в частности, кроме основной полосы 2,7 эВ видна также полоса в районе 2,65 эВ (скорее всего, фоновое крыло основной полосы), исчезающая с ростом температуры и не разрешаемая в спектрах при электрическом возбуждении.

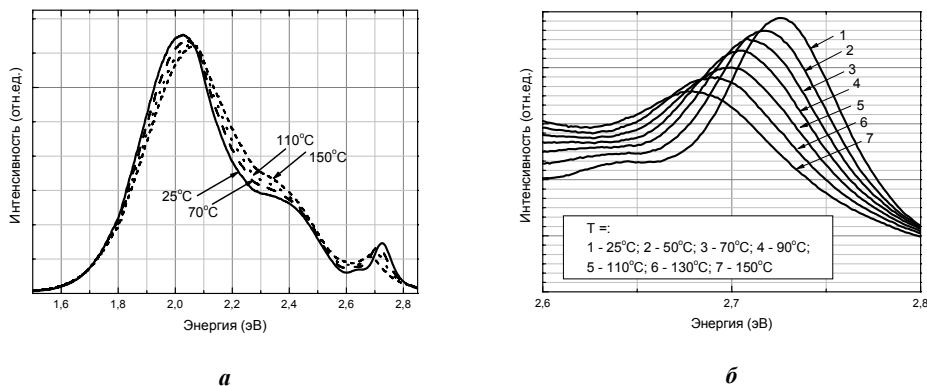


Рисунок 1. Спектры фотолюминесценции светодиодов при температурах 25°, 70°, 110° и 150°С (а) и их коротковолновая часть, соответствующая полосе излучения светодиодной гетероструктуры (б)

В отличие от электрического возбуждения, в данном случае интенсивность излучения в полосе 2,7 эВ относительно невелика, поскольку возбуждение гетероструктуры происходит через слой люминофора, в котором поглощается значительная часть возбуждающего излучения. К особенностям данного вида возбуждения относится и то, что люминофор при этом возбуждается в основном излучением лазера, а не исключительно излучением светодиодной гетероструктуры, как это имеет место при электрическом возбуждении. Из-за этой особенности общая интенсивность излучения образца существенно не изменяется в вышеуказанном температурном интервале (наблюдались небольшие изменения, сопоставимые с погрешностью измерений, см. таблицу).

В случае электрического возбуждения интегральная интенсивность свечения уменьшается с ростом температуры, так как люминофор возбуждается излучением диодной гетероструктуры, подверженным температурному тушению.

Показания измерителя мощности при различных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	25	50	70	90	110	130	150	25
$P, \text{мкВт}$	83,1	83,2	83,3	83,0	83,0	82,6	82,7	82,9

Как видно из рис. 1, а, при неизменной интегральной интенсивности свечения, свидетельствующей о термической стабильности люминофора в диапазоне температур измерений, происходит изменение формы спектров свечения. В отличие от полосы 2,7 эВ, которая, уширяясь, смещается с ростом температуры в длинноволновую область (типичное поведение для полупроводниковой гетероструктуры), максимум полосы излучения люминофора с ростом температуры смещается в коротковолно-

вую область. При этом происходит также небольшое изменение формы спектров. Сдвиг максимумов полос происходит линейно со скоростью $-0,38$ мэВ/К для полосы 2,7 эВ и $0,27$ мэВ/К для полосы 2,05 эВ (рисунок 2, а; 2, б).

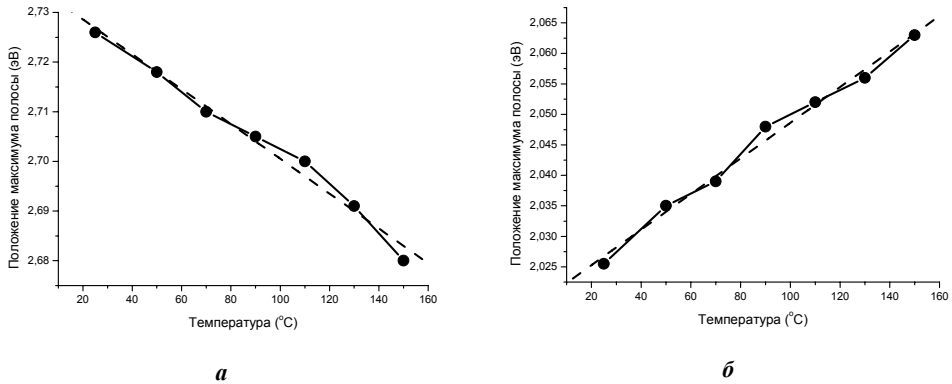
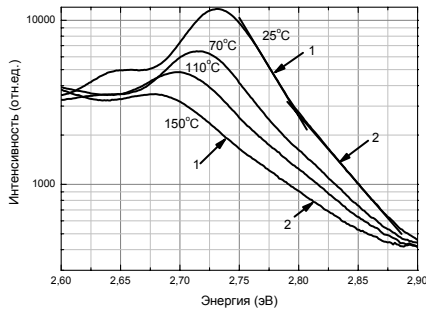


Рисунок 2. Зависимости положения максимума полосы 2,7 эВ (а) и 2,05 эВ (б) от температуры. Пунктиром показана аппроксимация линейной функцией с коэффициентом $-0,38$ мэВ/К (а) и $0,27$ мэВ/К (б)

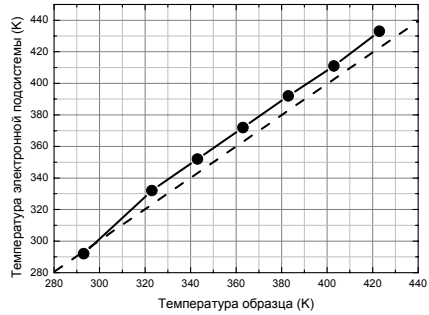
Скорость линейного коротковолнового сдвига менее интенсивной полосы 2,4 эВ, выделенной из спектров путем их деконволюции на полосы гауссовой формы, значительно ниже и составляет примерно $0,15$ мэВ/К. С ростом температуры наблюдается уширение полос 2,05 эВ и 2,7 эВ. Интегральная интенсивность полосы 2,05 эВ незначительно возрастает (за счет ее уширения), компенсируя этим небольшое снижение интенсивностей полос 2,4 эВ и 2,7 эВ.

Оценка температуры электронной подсистемы в гетероструктуре делалась по методике [3]. Отметим, что коротковолновое крыло спектров излучения гетероструктуры имеет два линейных участка в логарифмическом масштабе, условно обозначенные на рис. 3, а как 1 и 2. Оценка по участку 1 дает очень хорошее согласие с температурой образца, измеряемой с помощью термопары (рис. 3, б), тогда как оценка по участку 2 дает более высокие значения температуры.

Наличие в спектрах участка 2, соответствующего более высокой температуре электронной подсистемы, может свидетельствовать о наличии в структуре горячих электронов. Их появление может быть связано с процессами, приводящими к увеличению времени релаксации, часто наблюдаемыми в гетероструктурах с квантовым ограничением [4, 5] и имеющими различную природу, например, термические выбросы носителей заряда в области барьеров и обкладочных слоев и их диффузию [6], явления, связанные с неидентичностью множественных квантовых ям [7], особенностями взаимодействия носителей заряда с фононной подсистемой [8] и функции плотности состояний [5]. Свой вклад может внести также и неидеальность квантовых ям, которые в случае нитридных гетероструктур могут иметь довольно сложную пространственно-энергетическую структуру [9]. Для выяснения причин появления участка 2 в спектрах требуются дополнительные исследования.



a



б

Рисунок 3. Спектры излучения светодиодной гетероструктуры в логарифмическом масштабе (а) и зависимость температуры электронной подсистемы от температуры образца, оцененная по методике [3] (б). Пунктирная линия соответствует равенству температуры образца и электронной подсистемы

Полученные результаты позволяют довольно точно оценивать температуру активного слоя гетероструктуры в предположении термодинамического равновесия электронной подсистемы и решетки. Из формы спектров видно, что такое равновесие в основном достигается для большинства неравновесных носителей заряда, хотя возможно также наличие некоторого количества «горячих» носителей. Найденные зависимости позволяют также разработать методику контроля температуры люминофора по спектрам его излучения. В отличие от сходной методики [10], для повышения надежности контроля можно использовать как положение максимума полосы 2,05 эВ, так и соотношение интенсивностей полос 2,05 и 2,4 эВ. Комбинация обеих методик позволит также оценивать разницу температур активного слоя гетероструктуры и люминофора при электрическом (инжекционном) возбуждении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования спектров фотолюминесценции излучателей светодиодных ламп при лазерном возбуждении в интервале температур от 25 °С до 150 °С определены скорости сдвига максимумов полос излучения гетероструктуры и люминофора с ростом температуры, составившие – 0,38 мэВ/К и 0,27 мэВ/К соответственно. Оценка температуры электронной подсистемы по форме коротковолнового крыла спектра излучения гетероструктуры соответствует температуре образцов. В то же время форма коротковолнового крыла спектра излучения гетероструктуры указывает на появление горячих носителей заряда, например, из-за замедления процессов релаксации фотовозбужденных электронов в гетероструктуре. Интенсивность излучения образцов стабильна во всем температурном интервале, в отличие от электрического (инжекционного) возбуждения. Это, а также иное распределение интенсивностей полос в спектрах по сравнению с наблюдаемым при электрическом возбуждении, обусловлено прямым оптическим возбуждением люминофора излучением лазера, частично поглощаемым в толще люминофора. Установленные закономерности позволяют разработать неразрушающий метод мониторинга температуры гетероструктур и люминофора светодиодных ламп по спектрам их излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гурский, А.Л. Взаимосвязь между колориметрическими и спектральными параметрами светодиодных ламп белого свечения / А.Л.Гурский, Н.В. Машедо // ЖПС. – 2020. – Т. 87, № 6. – С. 997–1004.
2. Гурский, А.Л. Роль эффекта перегрева активной области в процессах старения светодиодов белого свечения / А.Л.Гурский, Н.В. Машедо // Материалы и структуры современной электроники: матер. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14-16 окт. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В.Б. Оджаяев (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2020. – С.39–45.
3. 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.
4. Asada, M. Intraband Relaxation Time in Quantum-Well Lasers // IEEE J. Quant. Electron. — 1989. — Vol.25, № 9. — P. 2019 – 2026.
5. Indirect Measurement of Electron Energy Relaxation Time at Room Temperature in Two-Dimensional Heterostructured Semiconductors / A. Sužiedelis [et al.] // Materials. – 2022. – Vol.15. – P. 3224 (16 pp).
6. Carrier relaxation and recombination in GaAs/AlGaAs quantum heterostructures and nanostructures probed with time-resolved cathodoluminescence / H. T. Lin [et al.] // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 81, № 7. – P. 3186–3195.
7. Cascade Electron Transfer Induces Slow Hot Carrier Relaxation in CsPbBr₃ Asymmetric Quantum Wells / P. Maity [et al.] // ACS Energy Lett. – 2021. – Vol. 6. – P. 2602–2609.
8. Enhanced hot electron lifetimes in quantum wells with inhibited phonon coupling / H. Esmailpour [et al.] // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – P. 12473 (9 pp).
9. Stimulated emission due to localized and delocalized carriers in Al_{0,35}Ga_{0,65}N/Al_{0,49}Ga_{0,51}N quantum wells / J. Mickevicius [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 101. – P. 041912 (4 pp).
10. Noncontact and instant detection of phosphor temperature in phosphor-converted white LEDs / T.-H. Yang [et al.] // Scientific Reports. — 2018. — Vol.8. — P. 296 (11 pp).

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА ПРИ РЕАКТИВНОМ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПЛЕНОК ОКСИДА ТИТАНА-АЛЮМИНИЯ

Х. Т. Доан¹, Н. А. Кананович²

¹⁾ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: thehoang1979@gmail.com

²⁾ Физико-технический институт НАН Беларуси, ул. Академика Купревича, 10, 220084
Минск, Беларусь, e-mail: nikita.kananovich@gmail.com

Проведены исследования влияния газовой среды в процессе реактивного магнетронного распыления Ti-Al составной мишени на элементный состав наносимых пленок оксида титана-алюминия. Установлено, что при низких концентрациях кислорода в Ar/O₂ смеси газов в процессе нанесения (менее 15 %) состав пленок зависит от парциального давления кислорода, что приводит к изменению относительного содержания металлов в пленке. Для нанесения пленок оксида титана-алюминия стабильного состава предпочтительней использовать реактивный режим работы системы при концентрации кислорода более 15 %.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление; составная мишень; тонкие пленки; оксид титана-алюминия; элементный состав.