

УДК 621.382.019.3

Анализ тепловых свойств линеек светодиодов методом переходных электрических процессов

С. А. Манего¹⁾, Ю. А. Бумай¹⁾, И. А. Хорунжий¹⁾, Ю. В. Трофимов²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий» НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Повышение энергоэффективности работы твердотельных осветительных устройств в народном хозяйстве Республики Беларусь является актуальной задачей. Современные проблемы энергоэффективного освещения многогранны и имеют широкий спектр. Особенно это актуально в условиях энергетического и мирового экономического кризиса. Так, на освещение в Беларуси расходуется 10–13 % от общего потребления электроэнергии. Таким образом, имеется значительный потенциал энергосбережения за счет перехода к энергоэффективному освещению. Рассмотрены вопросы надежности и долговечности работы твердотельных осветительных устройств, созданных на основе светодиодных линеек фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd. Оценка надежности оптоэлектронных приборов базируется на исследовании закономерностей развития механизмов деградации, приводящих к отказам того или иного типа. Выяснение причин деградации необходимо, чтобы затем, целенаправленно воздействуя на них, уменьшить скорость и величину деградации. Одной из основных причин деградации светодиодных устройств является температурный перегрев активной области светодиодного чипа. Поэтому актуальными становятся методы оценки тепловых характеристик твердотельных осветительных устройств. В статье исследованы тепловые свойства мощных синих светодиодных линеек методом переходных электрических процессов. Рассчитаны температуры активной области светодиодов в линейках при различных условиях теплоотвода и значениях токов инжекции. Проведено компьютерное моделирование тепловых полей линеек при нагреве с использованием пакета ANSYS. Установлено, что из степени неоднородности распределения температуры вдоль линейки следует невозможность выделения тепловых свойств элементов структуры чипов линейки на основе усредненных по всем светодиодам временных зависимостей температуры. Показано, что тепловые параметры линеек светодиодов с достаточной точностью можно получить, используя представление линейки только двумя эквивалентными RC-цепочками, соответствующими тепловым путям «активная область светоизлучающего светодиода – алюминиевая подложка» и «алюминиевая подложка – окружающая среда». Для данных областей определены тепловые постоянные времени, тепловые сопротивления и теплоемкости.

Ключевые слова: энергоэффективность, светодиоды, линейки светодиодов, тепловое сопротивление, теплоемкость, теплоотвод

Для цитирования: Анализ тепловых свойств линеек светодиодов методом переходных электрических процессов / С. А. Манего [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 74–86

Адрес для переписки

Манего Сергей Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-10-79
kaf_etf@dntu.by

Address for correspondence

Manego Sergey A.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-10-79
kaf_etf@dntu.by

Analysis of Thermal Properties of the LED-Lines by Method of Electrical Transient Processes

S. A. Manego¹⁾, Bumai Yu. A.¹⁾, Khorunzhii I. A.¹⁾, Trofimov Yu. V.²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Republican Scientific-Production Unitary Enterprise 'Center of LED and Optoelectronic Technologies', National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Increasing the solid lighting facilities operational energy-efficiency in the national economy of the Republic of Belarus is of current concern. The modern problems of energy-saving lighting are multifaceted and broad-ranging. It is particularly burning amidst the energy crisis and the world commercial slump. Thus, the lighting demands 10–13 % of the total electric energy consumption in Belarus. That is to say, there is a significant potential of energy saving in transition to energy-efficient lighting. The paper considers the issues of reliability and service period of the solid-state lighting devices created on the basis of lines of light-emitting-diodes (LED) produced by Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd. The optoelectronic apparatuses reliability assessment is based on investigation of the development principles and deterioration mechanisms leading to failures of one kind or another. The deterioration causes ascertainment is indispensable for acting upon them later on and thus reducing the degradation speed and extent. One of the LED-devices deterioration main sources is the temperature overheat of the LED-chip active area. Therefore, techniques for evaluating the heat characteristics of solid lighting devices become the issue of the day. The article investigates thermal properties of high-capacity blue LED-lines by method of electrical transient processes. The authors calculate temperatures in the LED-lines active areas at various heat-dissipation conditions and injection currents values. They realize computer generated simulation of the heated lines thermal fields applying the ANSYS packet. The study concludes that out of the degree of temperature-distribution heterogeneity along the line impossibility of the line chip structural units thermal characteristics extraction arises based on all LEDs homogenized over the line temperature-time dependences. The paper indicates that one can with reasonable accuracy obtain the LED-lines thermal parameters employing the line representation with two equivalent RC-strings corresponding the thermal ways 'LED active area – aluminium base' and 'aluminium base – environment'. For these areas thermal time constants, thermal resistances and thermal capacities are determined.

Keywords: energy efficiency, light-emitting-diodes, LED-line, thermal resistance, heat capacity, heat dissipation

For citation: Manego S. A., Bumai Yu. A., Khorunzhii I. A., & Trofimov Yu. V. Analysis of Thermal Properties of the LED-Lines by Method of Transient Electric Processes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 74–86 (in Russian)

Введение

Появление эффективного светодиодного освещения согласно оценкам может привести к снижению затрат электроэнергии до 40 %, вследствие чего производство и использование неэффективных ламп накаливания в ряде стран запрещено законодательством [1]. Линейки мощных светоизлучающих светодиодов (СИД) широко используются в настоящее время для создания осветительных устройств различного назначения. Одним из основных параметров, определяющих срок службы мощных СИД и светодиодных устройств (СУ) на их основе, является температурный режим работы [2]. В связи с этим тепловому дизайну и, следовательно, методам определения температур активных областей СИД и СУ уделяется особое

внимание. Выбор надежной, технологичной, эффективной и дешевой методики контроля не только абсолютных величин температур активных областей СИД и СУ, но и изменения их в процессе эксплуатации актуален как в научном, так и в прикладном аспекте для оптимизации конструкторско-технологических режимов изготовления СУ по тепловым параметрам. Необходимо также отметить, что декларируемые фирмами-производителями тепловые параметры СУ не всегда соответствуют действительным значениям, что вызывает необходимость проводить дополнительное тестирование и выявление потенциально ненадежных в тепловом отношении устройств.

Для определения температуры СИД и СУ применяется широкий набор в основном косвенных методик [3]. Одним из наиболее простых для реализации (требующим всего лишь наличия программируемого источника питания или аналогичного устройства) является метод переходных электрических процессов, использующий саморазогрев СИД импульсом тока и анализ временной зависимости изменения прямого напряжения СИД. Данный метод позволяет определить не только температуру активной области СИД (в том числе в составе СУ), но и структуру тепловых сопротивлений R_i и теплоемкостей C_i элементов конструкции СИД и внешнего теплоотвода [4–11]. Определение указанных параметров базируется на аналогии процессов протекания электрического тока и распространения теплоты, основанной на изоморфизме описывающих эти процессы уравнений. В рамках данного метода процесс распространения теплоты моделируется с использованием последовательно соединенных параллельных RC цепочек – схемы Фостера, которая для получения значений тепловых сопротивлений и теплоемкостей элементов конструкции СИД должна быть преобразована в схему Кауера.

Вместе с тем, несмотря на многочисленные публикации по данному методу со всевозможными уточнениями и дополнениями и созданные специализированные установки по определению тепловых параметров элементов СИД и СУ, такие как, например, T3Ster и заложенные в них подходы [4–9], интерпретация временных зависимостей температур нагрева и временных спектров тепловых сопротивлений достаточно трудна и часто субъективна [12]. Основные проблемы, влияющие на результаты анализа в рамках данного метода, состоят в следующем. Распространение теплоты в большинстве случаев трехмерное, моделируется одномерной системой цепочек. Существуют трудности при разделении RC цепочек с близкими постоянными времени $\tau = RC$. Значительное влияние на результаты обработки временных зависимостей температур нагрева оказывают выбор временного интервала и шага измерений, шумы, а также усреднение по площади поверхности СИД. Использование процедуры преобразования схемы Фостера в более физическую схему Кауера до исчезновения остатка [13] приводит к тому, что в каждой последующей цепочке накапливается ошибка от предыдущей. Это сильно ограничивает количество цепочек для получения достоверных результатов и предъявляет повышенные требования к осуществлению математической обработки такой трансформации.

Все это приводит к тому, что метод переходных электрических процессов и интерпретация результатов измерений должны быть адаптированы к каждому конкретному СУ. В случае светодиодных линеек существуют дополнительные условия, усложняющие использование данного метода, а значит, и анализ кривых нагрева или охлаждения. Усреднение идет по всем СИД линейки в условиях трехмерного растекания теплоты по пластине теплоотвода, т. е. существует разница в нагреве СИД на концах линейки и в ее середине. Это может повлиять на вид зависимости усредненной температуры СИД линейки от времени и, следовательно, ограничивать возможности метода для получения структуры тепловых сопротивлений элементов СИД и внешнего теплоотвода.

Целью исследований являлись анализ тепловых свойств мощных светодиодных линеек и установление особенностей применения для этого метода переходных электрических процессов. Для апробации метода выбраны линейки светодиодов фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd [14], представляющие собой линейный ряд СИД на массивной алюминиевой пластинке, являющейся теплоотводом. Линейки такого же типа выпускают и другие производители [15–18].

Результаты исследования и их обсуждение

Измерение тепловых параметров линеек синих светодиодов фирмы Paragon мощностью до 8 Вт как при наличии, так и при отсутствии дополнительного внешнего теплоотвода (ребристого алюминиевого радиатора) проводили на автоматизированной установке [19], включающей мультиметр HP34401A и источник напряжения E3643A (производство Agilent Technologies). Использовались переходные электрические процессы при подаче прямоугольного импульса тока длительностью до 150–200 с, соответствующей выходу линеек на тепловой режим, близкий к стационарному. Температуру активной области СИД линеек определяли по изменению с течением времени прямого напряжения смещения на малом токе с последующим пересчетом в температуру с использованием предварительно определенного температурного коэффициента напряжения. Диапазон изменения импульсных токов нагрузки, вызывающих нагрев линейки СИД, составлял 80–600 мА. Методика измерений и их обработки описана в американском военном стандарте JESD 51-1, Integrated Circuit Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) [20].

Кривые остывания активной области линеек синих СИД после выключения электрической нагрузки представлены на рис. 1.

На температурных зависимостях кривых охлаждения от времени можно выделить три интервала с разными скоростями изменения температуры: $t \leq 10^{-2}$ с, $10^{-2} < t \leq 5 \cdot 10^{-1}$ с, $t > 5 \cdot 10^{-1}$ с для СИД без радиатора (рис. 1а) и $t \leq 1$ с, $1 < t \leq 30$ с, $t > 30$ с для СИД с радиатором (рис. 1б). Последние интервалы соответствуют выходу линейки на стационарный режим.

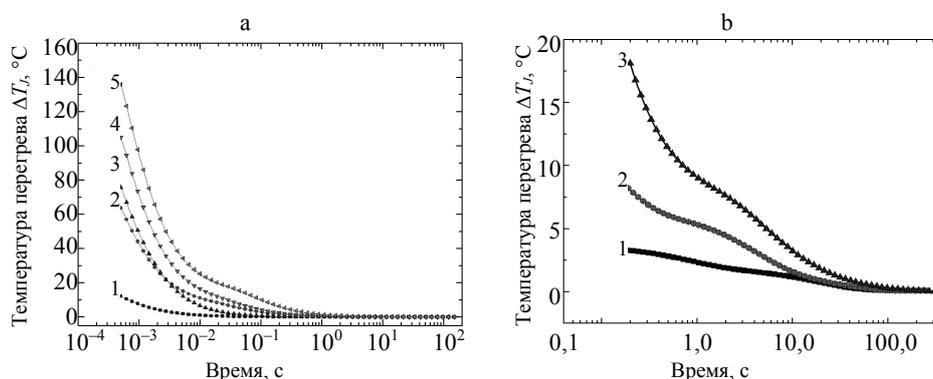


Рис. 1. Кривые охлаждения линеек синих СИД:

а – без радиатора для токов накачки: 1 – 80 мА; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600 мА;
б – то же с радиатором для токов: 1 – 200 мА; 2 – 400; 3 – 600 мА

Fig. 1. Cooling curves of the blue LED lines:

а – without a heatsink for pumping currents: 1 – 80 мА; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600 мА;
б – same with a heatsink for currents: 1 – 200 мА; 2 – 400; 3 – 600 мА

Зависимости температуры перегрева активных областей линеек синих светодиодов от величины тока инжекции после выхода на стационарный режим представлены на рис. 2. Видно, что перегрев активной области светодиодов линеек без радиатора при токе накачки 600 мА достигал 138 °С (рис. 2, кривая 1), т. е. значений, превышающих предельную температуру для данных светодиодов.

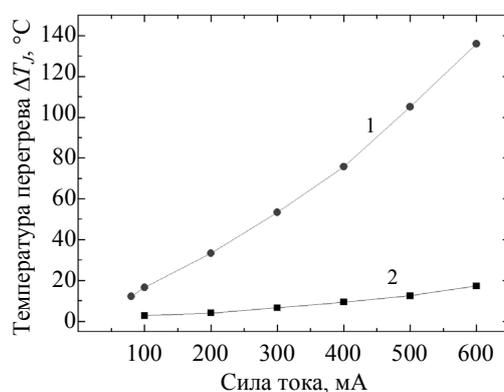


Рис. 2. Зависимость температуры перегрева активных областей линеек синих СИД без радиатора (1) и с радиатором (2) от величины тока инжекции

Fig. 2. The blue LED lines active areas overheating temperature dependence on injection current value without a heatsink (1) and with a heatsink (2)

Применение ребристого алюминиевого радиатора позволило существенно снизить температуру перегрева активной области светодиодов (рис. 2, кривая 2). Необходимо также отметить, что на эффективность внешнего теплоотвода заметное влияние оказывают пространственное по-

ложение радиатора и ориентация его ребер относительно восходящего воздушного потока при естественной конвекции.

Для получения распределения температур по линейке проведено компьютерное моделирование нагрева линейки с использованием пакета ANSYS. Учитывали только теплопроводность воздуха, конвективный теплообмен не учитывали. Результаты представлены на рис. 3.

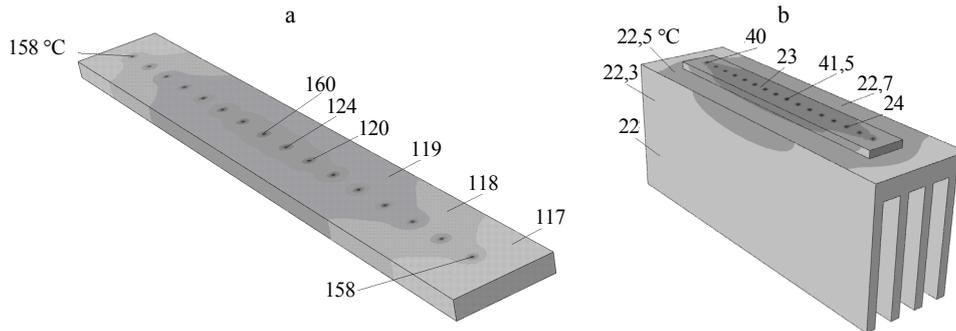


Рис. 3. Распределение температуры нагрева линеек синих СИД без радиатора (а) и с радиатором (б) при токе инжекции 600 мА через 150 с (после выхода на стационарный режим). Температура окружающей среды принята 20 °С

Fig. 3. The blue LED lines heating temperature distribution without a heatsink (a) and with a heatsink (b) with injection current 600 mA after 150 sec (after reaching the steady-state conditions). Environment temperature assumed 20 °С

Из картины тепловых полей линейки при отсутствии радиатора (рис. 3а) видно, что СИД линейки находятся в неравных тепловых условиях. В частности, нагрев СИД в центре линейки составляет 160 °С, крайних СИД 158 °С. Температура алюминиевой пластинки, на которой находятся СИД в центре линейки (непосредственно вблизи кристаллов СИД), составляет 124 °С и к краям снижается до 117 °С. Градиент температур в направлении, перпендикулярном пластинке, существенно ниже. При наличии массивного ребристого радиатора температура СИД (рис. 3б) снижается до 41,5 °С. Разброс температур становится меньше и составляет приблизительно 1 °С в плоскости линейки и 2 °С вдоль ребер радиатора. Необходимо отметить, что рассматриваемые градиенты температур линеек могут повышаться при учете конвективного теплообмена (зависящего от положения линеек), а также на ранних стадиях нагрева или охлаждения.

Таким образом, светодиодные линейки данного типа характеризуются достаточно неоднородным распределением температур, что необходимо учитывать при анализе тепловых свойств и определении тепловых параметров, например теплового сопротивления и его структуры. В первом приближении распространение теплоты в линейке можно представить как совокупность параллельных взаимодействующих тепловых потоков с различной временной кинетикой. Такое усреднение накладывает ограничения

на точность и достоверность определения тепловых сопротивлений элементов структуры отдельных СИД и линейки в целом.

В [21] показано, что для переходных процессов в тепловых цепях после выключения электрической мощности кривая остывания активной области светодиода может быть выражена суммой экспоненциальных членов, полученной для случая последовательно-параллельной схемы включения тепловых сопротивлений R_{th} и теплоемкостей C_{th} , т. е. в рамках схемы Фостера:

$$\Delta T(t) = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th,i}}\right) = P_T \sum_{i=1}^n R_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th,i}}\right), \quad (1)$$

где $\tau_{th,i}$ – тепловые постоянные времени элементов структуры СИД и теплоотвода; ΔT_i – изменение температуры на этих элементах; $R_{th,i}$ – тепловое сопротивление элементов; P_T – тепловая мощность.

В случае линейки $\tau_{th,i}$, ΔT_i , $R_{th,i}$ являются усредненными по всем СИД величинам.

Необходимо отметить, что из-за усреднения и разброса температур активных областей СИД линейки примерно на 2 К (рис. 3а) разброс тепловых сопротивлений составит ~0,3 К/Вт, в то время как тепловое сопротивление, например GaN, слоев синих СИД находится на уровне <0,1 К/Вт, а чипа СИД (до слоя посадки) не превышает ~1,0 К/Вт [11]. Поэтому разрешение элементов структуры тепловых сопротивлений чипов СИД рассматриваемых линеек является, по мнению авторов, проблематичным.

Кривые охлаждения линеек без радиатора, характеризующиеся большим интервалом изменения температур, в рамках формулы (1) с точностью 1–5 % были подогнаны суммой двух экспоненциальных слагаемых, соответствующих двум ступеням $R_{th}C_{th}$ цепи, которые с высокой вероятностью могут быть приписаны интегральному тепловому сопротивлению «активная область СИД – корпус» и «корпус – окружающая среда». Это согласуется с наличием первых двух интервалов с существенно различающимися скоростями изменения температуры (рис. 1а) и тем обстоятельством, что характерной особенностью данных линеек является наличие массивной алюминиевой подложки. Для учета последующих цепочек должно быть доказано, что их появление – это не следствие различия кинетик нагрева различных СИД линейки, так как в рассматриваемом случае их учет приводил к трудно поддающимся интерпретации результатам. Для подтверждения данного подхода использовали другой метод анализа, предложенный в [10, 11], основанный на построении временного спектра тепловых сопротивлений (рис. 4), который можно проанализировать на основе формулы

$$R^*(t) = \sum_{i=1}^n R_i \frac{t}{\tau_{th,i}} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_{th,i}}\right). \quad (2)$$

Для данного спектра в случае значительно различающихся значений $\tau_{th,i}$ для соседних RC цепочек можно считать $\tau_{th,i} \approx t$ в максимумах $R^*(t)$. На рис. 4 явно выделяются значительно различающиеся по временной шкале два бесструктурных пика с характерными временами порядка ~ 1 мс и ~ 100 мс, которые, как упоминалось ранее, можно связать с тепловыми сопротивлениями «активная область СИД – корпус» и «корпус – окружающая среда».

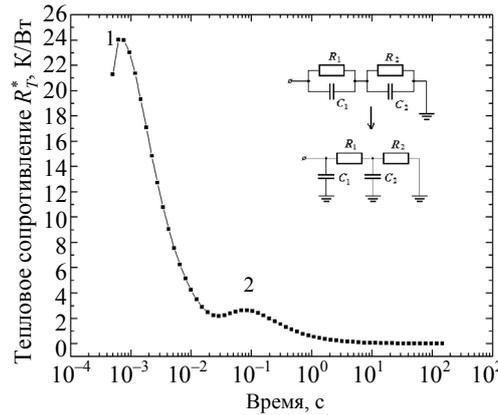


Рис. 4. Временной спектр тепловых сопротивлений линейки синих СИД без радиатора, построенный согласно [10, 11]

Fig. 4. Heat resistances time spectrum of the blue LED lines without a heatsink built according [10, 11]

Таким образом, достаточно хорошие результаты при анализе кривых охлаждения рассматриваемых светодиодных линеек дает подгонка в рамках формулы

$$\Delta T(t) = \Delta T_{JC} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th,JC}}\right) + \Delta T_{CA} \exp\left|-\frac{t}{\tau_{th,CA}}\right|, \quad (3)$$

где $\tau_{th,JC} \approx R_{th,JC}C_{th,JC}$ и $\tau_{th,CA} \approx R_{th,CA}C_{th,CA}$ – тепловые постоянные времени «активная область СИД – корпус» и «корпус – окружающая среда»; ΔT_{JC} , ΔT_{CA} – изменения температуры на тепловых сопротивлениях $R_{th,JC}$ и $R_{th,CA}$ соответственно.

Первая ступень эквивалентной $R_{th}C_{th}$ цепи связана с чипами светодиодов и слоями посадки на алюминиевую подложку, вторая ступень обусловлена подложкой, радиатором (при его наличии) и конвекционными потерями теплоты. Необходимо также отметить, что в этом случае из-за значительно отличающихся тепловых постоянных времени параметры в схемах Фостера и Кауера совпадают (вставка на рис. 4). Поскольку теплоемкости на последующей ступени значительно больше, чем на предыдущей, то в схеме Фостера они могут быть рассмотрены как короткозамкнутые на землю, и в данном случае нет необходимости в пересчете при переходе от одной схемы к другой.

Зависимость четырех подгоночных параметров в формуле (2) от величины тока накачки для линеек синих светодиодов без внешнего теплоотвода представлена на рис. 5.

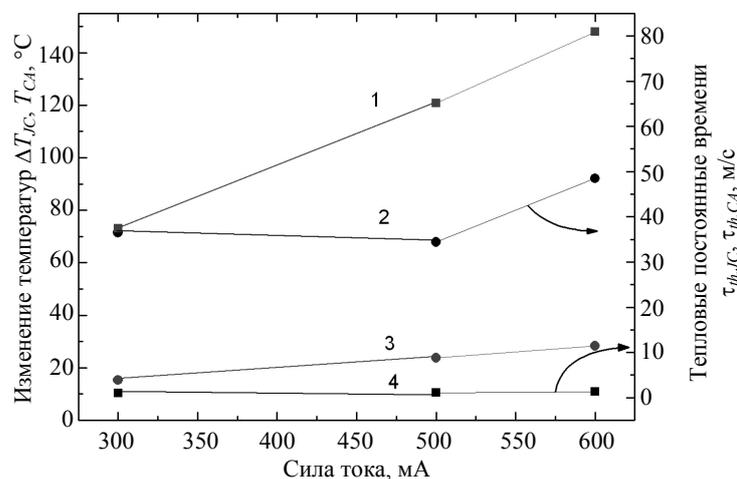


Рис. 5. Зависимость подгоночных параметров ΔT_{JC} (1), ΔT_{CA} (3), $\tau_{th,JC}$ (4), $\tau_{th,CA}$ (2) от величины тока инжекции для линеек синих СИД без радиатора

Fig. 5. Adjustable parameters ΔT_{JC} (1), ΔT_{CA} (3), $\tau_{th,JC}$ (4), $\tau_{th,CA}$ (2) dependence on the value of injection current for the blue LED lines without a heatsink

Из рис. 5 видно, что тепловые постоянные времени $\tau_{th,JC}$ и $\tau_{th,CA}$ лежат в том же миллисекундном интервале, что и на рис. 4, различаются более чем на порядок и слабо зависят от тока инжекции. Для линеек светодиодов получены следующие значения тепловых постоянных времени:

$$\tau_{th,JC} = 1,14 \pm 0,12 \text{ мс}; \quad \tau_{th,CA} = 39,8 \pm 5,8 \text{ мс}.$$

Зная изменения температур ΔT_{JC} и ΔT_{CA} и мощность электрического тока P , проходящего через линейку, можно определить соответствующие тепловые сопротивления $R_{th,JC} = \Delta T_{JC}/P$ и $R_{th,CA} = \Delta T_{CA}/P$ и теплоемкости $C_{th,JC} = \tau_{th,JC}/R_{th,JC}$ и $C_{th,CA} = \tau_{th,CA}/R_{th,CA}$.

В результате получены следующие значения тепловых сопротивлений и теплоемкостей для линеек синих светодиодов:

$$R_{th,JC} = 24,7 \text{ К/Вт}; \quad R_{th,CA} = 4,7 \text{ К/Вт};$$

$$C_{th,JC} = 46,0 \text{ мкДж/К}; \quad C_{th,CA} = 8,5 \text{ мДж/К}.$$

Необходимо отметить, что исходя из плотности $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ алюминия, его удельной теплоемкости $C_{уд} = 923 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ и коэффициента теплопроводности $K = 218 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [22, 23], а также толщины алюминиевой подложки $d = 2 \text{ мм}$, можно оценить (в предположении одномерного распространения теплоты) соответствующую ей постоянную времени, тепловое сопротивление и теплоемкость по формулам:

$$\tau = \frac{\rho C_{\text{уд}} d^2}{K}; \quad R = \frac{d}{KS}; \quad C = \rho C_{\text{уд}} S d. \quad (4)$$

Несмотря на то что расчетное значение постоянной времени алюминиевой подложки $\tau = 40$ мс было близким к полученным выше значениям $\tau_{th,CA}$, рассчитанное тепловое сопротивление оказалось малым, а теплоемкость большой по сравнению со значениями $R_{th,CA}$ и $C_{th,CA}$, полученными экспериментально. Это свидетельствует о том, что величины $R_{th,CA}$ и $C_{th,CA}$ определяются характером растекания теплоты в подложке (зависимостью от площади алюминиевой подложки S), и снижение $R_{th,CA}$ наряду с применением внешнего теплоотвода требует также улучшения теплового дизайна.

ВЫВОДЫ

1. Методом переходных электрических процессов исследованы тепловые свойства мощных алюминиевых светодиодных линеек (на примере линеек фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd). Определено изменение температуры активной области светодиодов в линейках при разных значениях тока инжекции и различных условиях теплоотвода.

2. Проведено компьютерное моделирование нагрева линеек с использованием пакета ANSYS. Определена степень неоднородности распределения температуры вдоль линейки, из которой следует невозможность выделения тепловых свойств элементов структуры чипов линейки на основе усредненных по всем светодиодам временных зависимостей температуры.

3. Показано, что применяя метод временных зависимостей температуры светодиодов и представление их двумя эквивалентными RC цепочками, соответствующими тепловым путям «активная область светодиодов – алюминиевая подложка» и «алюминиевая подложка – окружающая среда», можно получить с достаточно высокой точностью (<5 %) основные тепловые параметры линеек светодиодов. Так, используя подгонку экспериментальных данных в рамках данного представления, определены соответствующие тепловые постоянные времени, тепловые сопротивления и теплоемкости линеек синих светодиодов фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technology Co., Ltd.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ характеристик светодиодной продукции из базы данных LED Lighting Facts Департамента энергетики США (LED Lighting Facts 2014) // Современная светотехника. 2014. № 6. С. 7–20.
2. Внутреннее освещение. Аналитический отчет программы LED Lighting Facts Департамента энергетики США (LED Lighting Facts 2014) // Современная светотехника. 2015. № 2. С. 3–9.
3. Полищук, А. Г. Дegradация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Г. Полищук, А. Н. Туркин // Компоненты и технологии. 2008. № 2. С. 25–28.

4. Шуберт, Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. М.: Физматлит, 2008. 495 с.
5. Székely, V. Fine Structure of Heat Flow Path in Semiconductor Devices: a Measurement and Identification Method / V. Székely, Tran Van Bien // *Solid-State Electronics*. 1988. Vol. 31, No 9. P. 1363–1368.
6. Székely, V. A New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results / V. Székely // *Microelectronics Journal*. 1997. Vol. 28, No 3. P. 277–292.
7. Székely, V. Increasing the Accuracy of Thermal Transient Measurements / V. Székely, M. Rencz // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2002. Vol. 25, No 4. P. 539–546.
8. Masana, F. N. Thermal Impedance Measurements under Non-Equilibrium Conditions. How to Extend its Validity / F. N. Masana // *Microelectronics Reliability*. 2008. Vol. 48, No 4. P. 563–568.
9. Schweitzer, D. Transient Measurement of the Junction-to-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits / D. Schweitzer, H. Pape, L. Chen // *24th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, SEMI-THERM 2008*. San Jose, 2008. P. 193–199.
10. Development of a Standard for Transient Measurement of Junction-to-Case Thermal Resistance / H. Pape [et al.] // *12th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2011*. Linz, 2011. P. 1/8–8/8.
11. Bumai, Yu. A. Measurement and Analysis of Thermal Parameters and Efficiency of Laser Heterostructures and Light-Emitting Diodes / Yu. A. Bumai, A. S. Vaskou, V. K. Kononenko // *Metrology and Measurement Systems*. 2010. Vol. 17, No 1. P. 39–46.
12. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A. L. Zakgeim [et al.] // *EuroSimE 2013: 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. Wroclaw, Poland, 2013. Article number 6529922.
13. Smith, B. Utility of Transient Testing to Characterize Thermal Interface Materials / B. Smith, T. Brunschwiler, B. Michel // *THERMINIC 2007: 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. Budapest, 2007. P. 6–11.
14. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники: в 2-х т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 1. 536 с.
15. Официальный сайт фирмы Paragon Semiconductor Lighting Technologies Co. [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: http://paragonled.com/eng/series_1.html. Дата доступа: 09.10.2013.
16. Алюминиевые светодиодные линейки со светодиодами фирмы Cree [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: http://leoled.ru/otkrytaya_svetodiodnaya_lenta. Дата доступа: 16.09.2015.
17. Алюминиевые светодиодные линейки фирмы Philips Lumileds [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.lightingmedia.ru/news/>. Дата доступа: 16.09.2015.
18. Алюминиевые светодиодные линейки фирмы Seoul Semiconductor [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.sea-ge.com/svetodiodnaya-produktsiya/svetodiodnye-lineyki-i-moduli>. Дата доступа: 16.09.2015.
19. Алюминиевые светодиодные линейки фирмы Lumileds Lighting [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.lumileds.com/products/matrix-platform/luxeon-xf-35351>. Дата доступа: 16.09.2015.
20. Манего, С. А. Анализ переходных тепловых процессов в светодиодах / С. А. Манего, С. И. Лишик // *Наука – образованию, производству, экономике: материалы 8-й Международ. науч.-техн. конф.*, г. Минск, 15 апр. 2010 г. / под ред. Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюка, А. С. Калиниченко. Минск: БНТУ, 2010. Т. 3. С. 349.

21. JEDEC/JESD 51-1: Integrated Circuit Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device), Dec. 1995 [Electronic resource] 2015. Mode of Access: http://www.thermengr.net/html/jedec_stds.html. Дата доступа: 10.10.2013.
22. Masana, F. N. A New Approach to the Dynamic Thermal Modelling of Semiconductor Packages / F. N. Masana // *Microelectronics Reliability*. 2001. Vol. 41, No 6. P. 901–912.
23. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3. 728 с.

Поступила 01.10.2015 Подписана в печать 30.11.2015 Опубликована онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Analysis of the Characteristics of LED Products from the Database of LED Lighting Facts Department of Energy (LED Lighting Facts 2014). *Sovremennaiia Svetotekhnika* [Modern Lighting Technology], 2014, 6, 7–20 (in Russian).
2. Interior Lighting. Analytical Report on the LED Lighting Facts Program of the U.S. Department of Energy (LED Lighting Facts 2014). *Sovremennaiia Svetotekhnika* [Modern Lighting Technology], 2015, 2, 3–9 (in Russian).
3. Polishchuk A. G., & Turkin A. N. (2008) Degradation of Semiconductor LEDs Based on Gallium Nitride and its Solid Solutions. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies], 2008, 2, 25–28 (in Russian).
4. Schubert F. (2003) *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press. 313 p. (Russ. ed.: Schubert F. (2008) *Svetodiody*. Moscow, Fizmatlit. 495 p.)
5. Székely V., & Tran Van Bien. (1988) Fine Structure of Heat Flow Path in Semiconductor Devices: a Measurement and Identification Method. *Solid-State Electronics*, 31 (9), 1363–1368. DOI: 10.1016/0038-1101(88)90099-8.
6. Székely V. (1997) A New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results. *Microelectronics Journal*, 28 (3), 277–292.
7. Székely V., & Rencz M. (2002) Increasing the Accuracy of Thermal Transient Measurements. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25 (4), 539–546. DOI: 10.1109/TCAPT.2002.808002.
8. Masana F. N. (2008) Thermal Impedance Measurements under Non-Equilibrium Conditions. How to Extend its Validity. *Microelectronics Reliability*, 48 (4), 563–568. DOI: 10.1016/j.microrel.2007.11.005.
9. Schweitzer D., Pape H., & Chen L. (2008) Transient Measurement of the Junction-to-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits. *24th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, SEMI-THERM 2008*. San Jose, 193–199. DOI: 10.1109/STHERM.2008.4509389.
10. Pape H., Schweitzer D., Chen L., Kutscherauer R., & Walder M. (2011) Development of a Standard for Transient Measurement of Junction-to-Case Thermal Resistance. *12th Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2011*. Linz, 1/8–8/8. DOI: 10.1109/ESIME.2011.5765862.
11. Bumai Yu. A., Vaskou A. S., & Kononenko V. K. (2010) Measurement and Analysis of Thermal Parameters and Efficiency of Laser Heterostructures and Light-Emitting Diodes. *Metrology and Measurement Systems*, 17 (1), 39–46. DOI: 10.2478/v10178-010-0004-x.
12. Zakgeim A. L., Chernyakov A. E., Vaskou A. S., Kononenko V. K., & Niss V. S. (2013) Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types. *EuroSimE 2013: 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. Wroclaw, Poland, Article number 6529922. DOI: 10.1109/EuroSimE.2013.6529922.
13. Smith B., Brunswiler T., & Michel B. (2007) Utility of Transient Testing to Characterize Thermal Interface Materials. *THERMINIC 2007: 14th International Conference on Thermal,*

- Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*. Budapest, 6–11. DOI: 10.1109/THERMINIC.2007.4451738.
14. Neiman L. R., & Demirchyan K. S. (1981) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 1*. Leningrad, Energoizdat. 536 p. (in Russian).
 15. *The Official Website of the Company Paragon Semiconductor Lighting Technologies Co.* Available at: http://paragonled.com/eng/series_1.html. (Accessed 9 October 2013), (in Russian).
 16. *Aluminum LED Bar with LEDs by Cree*. Available at: http://leoled.ru/otkrytaya_svetodiodnaya_lenta. (Accessed 16 September 2015) (in Russian).
 17. *Aluminum LED Line Philips Lumileds*. Available at: <http://www.lightingmedia.ru/news/>. (Accessed: 16 September 2015) (in Russian).
 18. *Aluminum LED Line Company Seoul Semiconductor*. Available at: <http://www.sea-ge.com/svetodiodnaya-produktsiya/svetodiodnye-lineyki-i-moduli>. (Accessed: 16 September 2015) (in Russian).
 19. *Aluminum LED Line Lumileds Lighting Company*. Available at: <http://www.lumileds.com/products/matrix-platform/luxeon-xf-35351>. (Accessed: 16 September 2015) (in Russian).
 20. Manego S. A., & Lishik S. I. (2010) Analysis of Transient Thermal Processes in Light-Emitting Diodes. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Vosmoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 3* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 8th International Science and Technical Conference. Vol. 3]. Minsk: BNTU, 349 (in Russian).
 21. *JEDEC/JESD 51-1, 'Integrated Circuit Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)', Dec. 1995*. Available at: http://www.thermengr.net/html/jedec_std.html. (Accessed: 10 October 2013).
 22. Masana F. N. (2001) A New Approach to the Dynamic Thermal Modelling of Semiconductor Packages. *Microelectronics Reliability*, 41 (6), 901–912. DOI: 10.1016/S0026-2714(01)00013-0.
 23. Koritskiy Yu. V., Pasinkov V. V., & Tareev B. M. (1988) *Handbook on Electrotechnical Materials. Vol. 3*. Leningrad, Energoatomizdat. 728 p. (in Russian).

Received: 1 October 2015 Accepted: 30 November 2015 Published online: 16 December 2015