

DOI: 10.18721/JPM.11304

УДК 628.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В МОЩНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ МАТРИЦАХ

**А.В. Аладов¹, И.В. Белов², В.П. Валюхов³,
А.Л. Закгейм¹, А.Е. Черняков¹**

¹ Научно-технологический центр микроэлектроники
и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Университет Йончёпинг, Инженерная школа, г. Йончёпинг, Швеция;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе теоретически и экспериментально исследовались зависимости теплового сопротивления и распределения температуры по площади от тока высокомоощных AlGaInN светодиодных матриц, изготовленных по технологии «чип на плате» (chip-on-board). Экспериментальные исследования тепловых процессов проводились как методом релаксации прямого напряжения с использованием прибора T3Ster, так и с применением инфракрасной термографии. Для интерпретации экспериментальных результатов проводилось трехмерное численное моделирование распределения тепла и теплообмена в светодиодной матрице с помощью программного пакета Flotherm 10.1. Получено хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными. Для оценки влияния деформации платы был предложен метод разбивки теплового сопротивления между радиатором и алюминиевой платой со светодиодной матрицей на зоны для моделирования влияния тепловой деформации. Применение модифицированной CFD-модели позволило прогнозировать распределение температурных полей, наблюдаемых в эксперименте. Деформация платы была подтверждена прямым измерением кривизны поверхности светодиодной матрицы.

Ключевые слова: светодиод, светодиодная матрица, тепловое сопротивление, ИК-термография, CFD-модель

Ссылка при цитировании: Аладов А.В., Белов И.В., Валюхов В.П., Закгейм А.Л., Черняков А.Е. Исследование теплового режима в мощных светодиодных матрицах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 3. С. 39–51. DOI: 10.18721/JPM.11304

A STUDY OF THERMAL REGIME IN THE HIGH-POWER LED ARRAYS

**A.V. Aladov¹, I.V. Belov², V.P. Valyukhov³,
A.L. Zakgeim¹, A.E. Chernyakov¹**

¹ Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center of RAS,
St. Petersburg, Russian Federation;

² Jönköping University, School of Engineering, Jönköping, Sweden;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Thermal resistance and temperature distribution for high-power AlGaInN LED chip-on-board arrays were measured by different methods and tools. The $p-n$ junction temperature was determined through measuring a temperature-dependent forward voltage drop on the $p-n$ junction, at a low measuring current after applying a high heating current. Furthermore, the infrared thermal imaging technique was employed to obtain the temperature map for the test object. A steady-state 3D computational model of the experimental setup was created including temperature-dependent power dissipation in the LED chips. Simulations of the heat transfer in the LED array were performed to further investigate temperature gradients observed in the measurements. Simulations revealed possible thermal deformation of the assembly as the reason for the hot spot formation. The bending of the assembly was confirmed by surface curvature measurements.

Key words: LED, LED matrix, thermal resistance, infrared thermography, thermal interface, CFD model

Citation: A.V. Aladov, I.V. Belov, V.P. Valyukhov, A.L. Zakgeim, A.E. Chernyakov, A study of thermal regime in the high-power LED arrays, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (3) (2018) 39–51. DOI: 10.18721/JPM.11304

Введение

Одной из главных тенденций последних лет в разработке и применении светодиодных (СД) источников для общего освещения является постоянное увеличение рабочих токов и плотности монтажа излучающих кристаллов в матрицах для обеспечения все более высоких значений выходной мощности [1, 2]. Повышение мощности и усложнение конструкции СД-источников света требует особого внимания к тепловым процессам как внутри отдельных СД, так и матрицы в целом; при этом не следует ограничиваться только оценкой общего теплового сопротивления, необходимо детально анализировать распределение температурных полей по площади (температурный мэппинг).

Поскольку температура в значительной степени влияет на значение внутреннего квантового выхода (ВКВ), ее распределение становится фактором, определяющим общие выходные характеристики СД-матриц (оптическую мощность и КПД). Соответственно, исследование неоднородности температурного распределения по площади матрицы как функции тока, представляется особенно важным применительно к современным СД-матрицам большой мощности.

Цель данной работы – детальный анализ теплового сопротивления и распределения температуры в высокомоощных светодиодных матрицах белого свечения.

Экспериментальная часть

Экспериментально исследовались тепловые процессы СД-матриц. Последние были изготовлены по технологии «chip-on-board» [3] с применением высокомоощных AlInGaN СД-кристаллов конструкции «face-up» [4]. В данном контексте особый интерес представляет проблема точного определения температурных градиентов на поверхности СД-матрицы, связанных с неравномерным выделением и отводом тепла от каждого кристалла в этой матрице. С этой целью было проведено как детальное моделирование теплового и токового распределения в реальной СД-матрице, так и экспериментальное определение прямыми и косвенными методами температуры излучающих кристаллов, расположенных в различных точках матрицы.

Прямой метод оценки температуры СД-кристаллов основан на использовании инфракрасного термографирования с высоким разрешением с применением ИК-тепловизора СВИФТ [5, 6]. Тепловое сопротивление измерялось методом релаксации температурочувствительного параметра – прямого напряжения с помощью прибора Thermal Transient Tester T3Ster [7, 8].

Данный раздел содержит описание экспериментальных образцов и применяемых экспериментальных методов оценки тепловых характеристик, включающих измерение тепловых сопротивлений, ИК-мэппинг,

а также измерение тепловой деформации платы СД в рабочем режиме.

Объекты исследования. В работе исследовались мощные матрицы на основе коммерческих кристаллов компании Epistar “ES-CABLV45P”. Излучающие кристаллы имели конструкцию “face-up” [9], в которой эпитаксиальная гетероструктура AlInGaN сохраняется на сапфировой подложке с низкой теплопроводностью ($\approx 0,34$ Вт/(см·К)). Оба контакта расположены на лицевой стороне, и вывод света осуществляется через полупрозрачный *p*-контакт. Излучающие кристаллы имели сложную «разветвленную» топологию электродов для достижения равномерного распределения тока при рабочем токе 400 мА [10]. СД-кристаллы размером 1140×1140 мкм и толщиной 150 мкм были смонтированы на алюминиевой печатной плате МРСВ методом “chip on board” (COB). СД-матрица представляла из себя сборку из 100 кристаллов, размером $45 \times 45 \times 1,0$ мм, суммарной входной мощностью до 100 Вт, что соответствует току 350 мА, проходящему через отдельный кристалл.

Светодиодная матрица содержала 10 параллельно соединенных светодиодных линеек, каждая из которых включала 10 кристаллов, соединенных последовательно. Общая площадь светодиодной матрицы составила 20×20 мм. Кристаллы были защищены силиконовым гелем с люминофором.

Алюминиевая плата с СД-матрицей была привинчена к радиатору. Диагональное расстояние между головками винтов крепления платы к радиатору составило 44 мм. Внешний вид СД-матрицы и поперечное сечение конструкции показаны на рис. 1.

Измерение тепловых сопротивлений. Тепловое сопротивление определяется на основе термоэлектрической аналогии, где вместо электрического тока рассматривается тепловой поток, а вместо напряжения — температура. Тепло распространяется от активной области к основанию кристалла, далее к алюминиевой плате носителю через клей, далее через термопасту к радиатору,

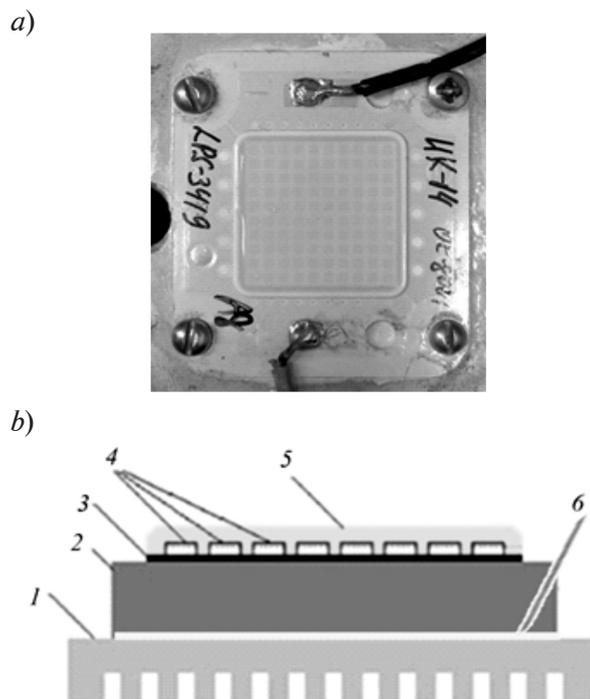


Рис. 1. Внешний вид СД-матрицы сверху (а) и схематическое изображение ее поперечного сечения (б):

1 – радиатор, 2 – алюминиевая плата, 3 – клей, 4 – СД-кристаллы, 5 – силиконовый гель, 6 – термопаста

которые составляют элементы эквивалентной тепловой цепи: СД-кристалла (R_{chip}), клея (R_{glue}), алюминиевой платы ($R_{Al\ plate}$). Подобная цепь в рамках модели Кауэра состоит из набора тепловых резисторов, подключенных через тепловые емкости к общей шине. Теплоемкости различных слоев конструкции СД-матрицы влияют лишь на переходные характеристики — скорости разогрева или охлаждения прибора при включении/выключении тока.

Для определения теплового сопротивления методом температурочувствительного параметра — времени релаксации прямого напряжения, первоначально матрица включается на малый тестовый ток 50 мА. При таком токе саморазогрев прибора исключен, и температура *p-n*-перехода задается внешним нагревателем в диапазоне $20 - 100$ °С с точностью $0,5$ °С. Прямое напряжение регистрируется как функция

температуры. Таким образом получается калибровочная кривая «прямоенапряжение – температура», близкая к линейной зависимости с коэффициентом – 13 мВ/К. Это значение в дальнейшем используется для определения температуры $p-n$ -перехода в реальном рабочем режиме.

Релаксация прямого напряжения (переходная характеристика) исследовалась при быстром переключении с малого тестового на большой рабочий ток. С этого момента начинался разогрев прибора с распространением теплового потока от активной области через кристалл, печатную плату к радиатору и окружающей среде. Изменение температуры $p-n$ -перехода в процессе разогрева регистрировалось по изменению прямого напряжения в момент подачи коротких импульсов тестового тока, «прорезающих» постоянный греющий рабочий ток с определенной частотой. Последующий математический анализ переходной характеристики напряжения на $p-n$ -переходе, с привлечением аппарата структурной функции [11], позволяет рассчитать компоненты эквивалентной тепловой цепи $R_{th,i}$, $C_{th,i}$, общее тепловое сопротивление ΣR_{th} и полную теплоемкость ΣC_{th} . График непрерывной кумулятивной структурной функции аппроксимировался ступенчатой функцией, являвшейся прямым представлением модели Кауэра теплового импеданса. Более детально с методами переходных характеристик и привлекаемым математическим аппаратом можно ознакомиться в работе [12] и приводимых в ней ссылках.

Прибор T3Ster первоначально предназначался для электронных устройств, и обработка данных предполагала, что электрическая мощность, подаваемая на устройство, полностью преобразуется в тепло. В современных высокоэффективных СД значительная доля подводимой электрической мощности преобразуется в световое излучение и, следовательно, не участвует в нагреве устройства. Для учета этого выходная оптическая мощность P_{opt} измерялась с помощью оборудования с интегрирующей сферой – «OL 770-LED High speed LED Test and Measurement» [13]. КПД исследуемых излучателей составлял 15 – 20 % (в зависи-

мости от входного тока). Соответствующая часть входной мощности, уносимая излучением, учитывалась при расчете теплового сопротивления.

ИК-термография. ИК-тепловизор СВИФТ с областью чувствительности в диапазоне 2,5 – 3,0 мкм [10] использовался для определения температуры поверхности СД-матрицы. Непосредственное измерение температуры с помощью тепловизора позволяет получать ее распределение по площади (так называемый температурный мэппинг).

Основными методическими проблемами теплового отображения структур на основе AlInGaN являлись прозрачность сапфировой подложки и эпитаксиальных слоев для длин волн ИК-диапазона и большая разница в излучательной способности материалов, используемых в СД, то есть полупроводниковых слоев, металлических контактов, отражающих покрытий, монтажных элементов и т. п. [14]. По этой причине для корректного пересчета интенсивности ИК-излучения в температуру требуется предварительная калибровка. Такая



Рис. 2. Фотография сферометра, использованного для измерения радиуса кривизны СД-матрицы:
1 – металлический штатив, 2 – заостренный наконечник, 3 – индикатор

калибровка проводилась под контролем температуры с помощью внешнего нагревателя в диапазоне 20 – 100 °С посредством записи ИК-излучения СД-матрицы при нулевом токе. Используя указанный выше подход, удалось провести измерения температуры с точностью до 2 К.

Измерения кривизны поверхности. Для оценки тепловой деформации СД-матрицы в процессе работы, использовался сферометр с индикатором часового типа фирмы Suss (Германия). С его помощью измеряли уровень подъема центра СД-матрицы в рабочем режиме (при протекании тока 3,5 А), по сравнению с положением этого центра при нулевом токе.

Сферометр состоит из металлического штатива, закрепленного на трех фиксированных ножках одинаковой длины (рис. 2 [15]), заостренного наконечника, проходящего по центру рамы параллельно трем опорам, и стандартного индикатора часового типа с градуировкой 0,01 мм, показывающего высоту наконечника выше или ниже поверхности, на которой находятся ножки сферометра. Смещение наконечника можно считывать с точностью до 5 мкм.

Гидродинамическая CFD-модель

На первом этапе моделирования тепло-растекания использовалась стационарная гидродинамическая модель (Computational Fluid Dynamics, CFD) для плоской матрицы, а затем (второй этап) учитывалась возможная деформация СД-матрицы (возникновение кривизны теплоотводящей поверхности).

Стационарная CFD-модель, описывающая тепловые процессы в экспериментальных образцах, была создана в программе

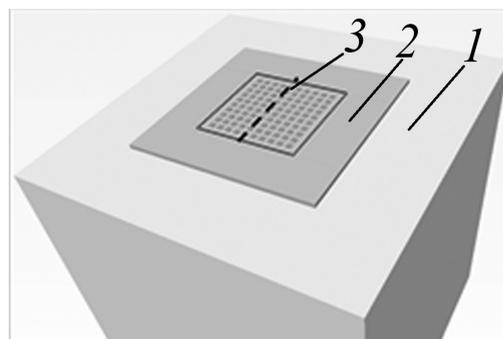


Рис. 3. CFD-модель экспериментальной установки:
1 – алюминиевый блок; 2 – СД-матрица, «покрытая силиконовым гелем»; 3 – исследованная центральная часть матрицы (обозначена пунктиром)

Flotherm 10.1 от компании Mentor Graphics (рис. 3 [16]). Цель моделирования состояла в том, чтобы воспроизвести результаты, полученные в эксперименте, и исследовать причины температурных градиентов между центром и периферией СД-матрицы. Массивный алюминиевый радиатор, имеющий цилиндрическую форму, был представлен алюминиевым блоком, а эффект от охлаждающих ребер – высоким коэффициентом теплопередачи (10000 Вт/(м²·К)), приложенным к стенкам алюминиевого блока.

Слой клея, который использовался для монтажа чипа, и слой термопасты (толщина 15 мкм) между пластиной и радиатором были смоделированы как тепловые сопротивления на соответствующих интерфейсах. Слой защитного силиконового геля имел толщину 300 мкм. Тепловое сопротивление клея, равное 2,6 К/Вт для каждого чипа, было получено из совокупной структурной функции, соответствующей греющему току в 1 А. Указанное значение тока обе-

Таблица

Термофизические свойства моделируемой системы [16 –18]

Элемент системы (материал)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³
СД-кристалл (сапфир)	36,0	3980,0
Плата и радиатор (алюминий)	201,0	2710,0
Защитный гель (силикон)	1,0	1000,0
Термопаста	0,67	–

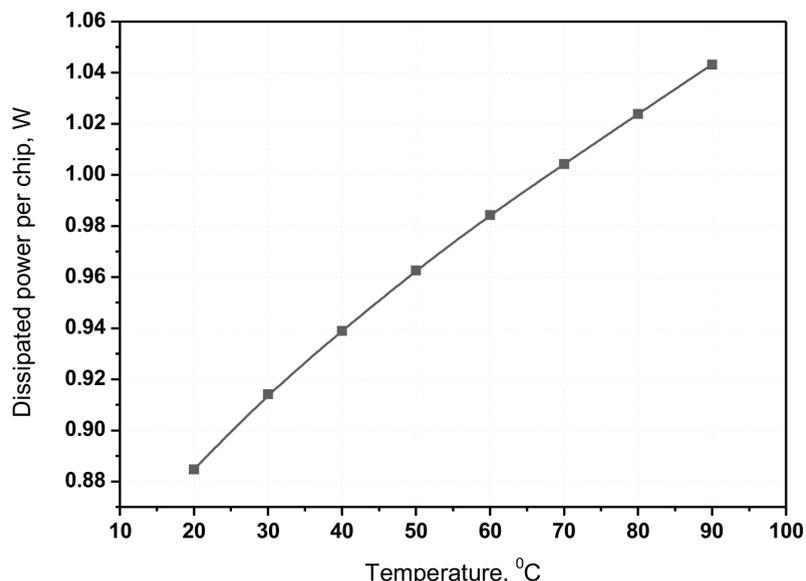


Рис. 4. Зависимость рассеиваемой мощности от температуры на одном СД-кристалле

спечивало наиболее равномерный нагрев СД-матрицы. Термофизические свойства материалов приведены в таблице.

На границах расчетной области заданы условия постоянного давления. Температура окружающей среды составляла 20 °С. В модели также учитывалось тепловое излучение. Для расчета была использована алгебраическая модель турбулентности. Результаты, не зависящие от расчетной сетки, были получены путем вычисления модели с различной плотностью ячеек. Расчетная область содержала 1,8 млн. ячеек с частными сетками для СД-кристалла, силиконового геля и алюминиевой платы. Зависимость выделяемой мощности СД от температуры, при фиксированном напряжении на СД (рис. 4), была получена по результатам измерений отдельного кристалла и учитывала оптическое охлаждение.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения теплового сопротивления для СД-матрицы представлены в виде кумулятивных структурных функций на рис. 5. По горизонтальной оси отложены значения теплового сопротивления R_{th} , по вертикальной — значения теплоемкости

C_{th} (в логарифмическом масштабе) от источника тепла до окружающей среды.

Значение общего теплового сопротивления

$$\Sigma R_{th} = R_{chip} + R_{glue} + R_{Al\ plate} \quad (1)$$

получено для трех токов: 1,0; 3,5 и 4,0 А. При этом, как можно видеть, с ростом тока величина (1) увеличивается от 0,3 до 0,5 К/Вт (примерно в 1,7 раза). Точки перегиба на кривых показывают значение теплового сопротивления при движении вдоль тепловой цепи. Причиной роста теплового сопротивления с током могло быть его перераспределение в пользу центральных линеек, по сравнению с периферийными и, таким образом, уменьшение размеров области генерации тепла и, соответственно, сечения теплоотода. Однако проверка показала, что разница в токах незначительна (в пределах 4 %), и, соответственно, выделение тепла может считаться почти однородным во всей СД-матрице. Следовательно, рост теплового сопротивления с током обусловлен не изменением генерации тепла, а изменением условий теплоотода.

Передача тепла от центра матрицы к окружающей среде становится хуже, чем

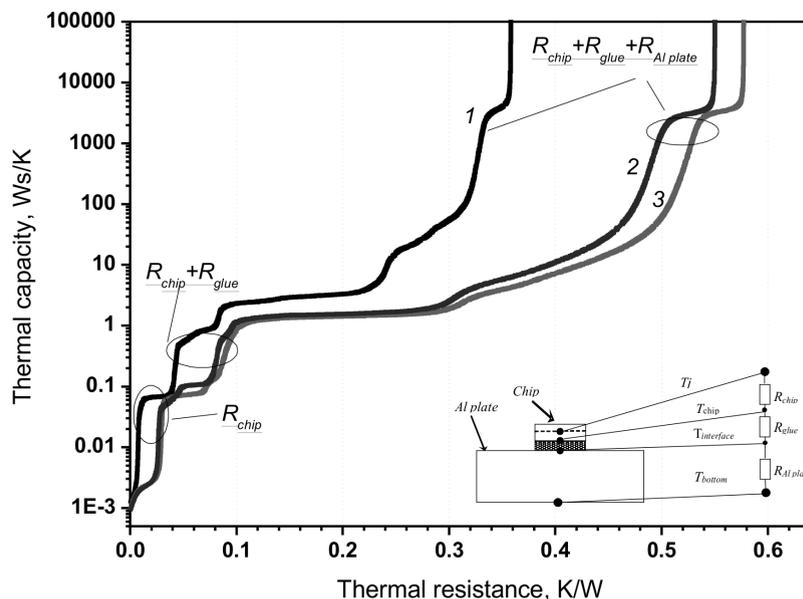


Рис. 5. Кумулятивные структурные функции (зависимости теплоемкости от теплового сопротивления) для СД-матрицы при разных токах, А: 1,0 (1) 3,5 (2) и 4,0 (3).
На вставке дана упрощенная схема тепловой цепи

на периферии пластины. Последнее было подтверждено прямым измерением распределения тепла с помощью ИК-тепловизора. Наблюдаемое распределение температуры вдоль центральной оси матрицы показано на рис. 6. Заметная разница температур, дости-

гающая 13 К, наблюдается между центральной и периферийной частями матрицы.

Первые результаты моделирования показали, что максимальная разница между значениями температуры в центре и на периферии СД-матрицы составляет 3 – 4 К.

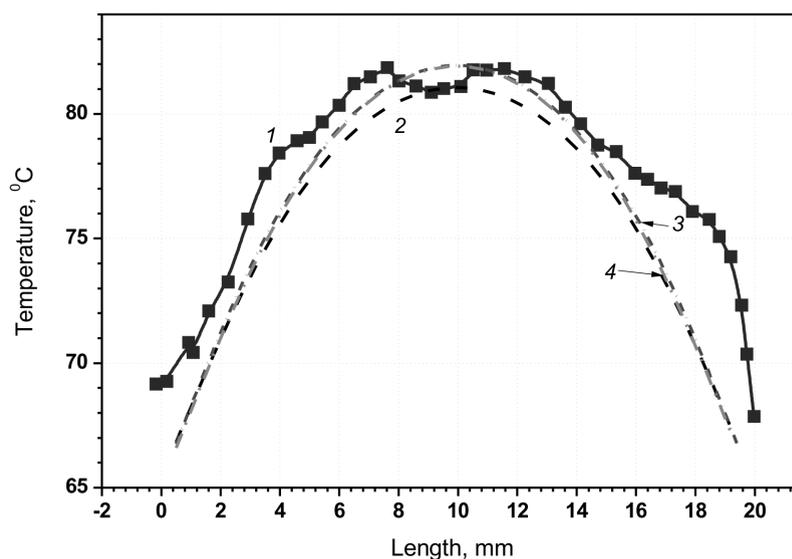


Рис. 6. Экспериментальные (символы 1) и расчетные (линии 2 – 4) температурные распределения вдоль центральных осей СД-матриц

Первоначально в CFD-модели предполагалось, что тепловое сопротивление между алюминиевой платой и радиатором не меняется в различных точках, то есть слой термопасты между алюминиевой пластиной и радиатором предполагался однородным.

В результате анализа расчетных данных и тщательного осмотра образцов СД-матриц было выдвинуто предположение, что изменение температуры (вплоть до 13 К) между центральными и периферийными чипами может быть вызвано изгибом алюминиевой платы. Изгиб же возникает ввиду интенсивного нагрева СД-кристаллов при жестких механических ограничениях, которые создаются винтами по углам пластины.

Тепловая деформация СД-матрицы была измерена сферометром в двух точках: в центре алюминиевой пластины и рядом с одним из винтов. Вертикальный сдвиг в рабочем режиме в центре СД-матрицы составил 80 мкм, а около винта практически не изменился. Следовательно, эксперимент подтвердил, что перегрев в центре СД-матрицы обусловлен тепловой деформацией алюминиевой пластины, приводящей к ухудшению теплового контакта между алюминиевой пластиной и радиатором.

Ухудшение теплового сопротивления на границе раздела между алюминиевой платой и радиатором было учтено в модели путем разбивки тепловых сопротивлений между радиатором и алюминиевой платой на зоны. На рис. 7 приведены примеры разбивки алюминиевой платы на 4 и 6 зон тепловых сопротивлений. Основанием для такой разбивки стало то, что из-за изгиба алюминиевой платы изменение (рост) теплового сопротивления вблизи ее краев должно быть меньше, по сравнению с центральной частью. Значения тепловых сопротивлений, присвоенные отдельным зонам, были получены в результате калибровки смоделированных температур относительно результатов измерений в центральной части СД-матрицы (температура поверхности силикона выше 80 – 82 °С для центральных чипов, и выше 65 – 68 °С для периферии, см. рис. 6). Кроме этого, результаты разбивки на тепловые зоны были сопоставлены с результатами для сопро-

тивления равномерного слоя термопасты (без разбивки на зоны). Использование в модели зон теплового сопротивления привело к хорошему согласованию с экспериментальными данными в измеренном диапазоне температур. Значения теплового сопротивления для тепловых зон представлены на рис. 8, а результаты моделирования и сравнения между измеренными дан-

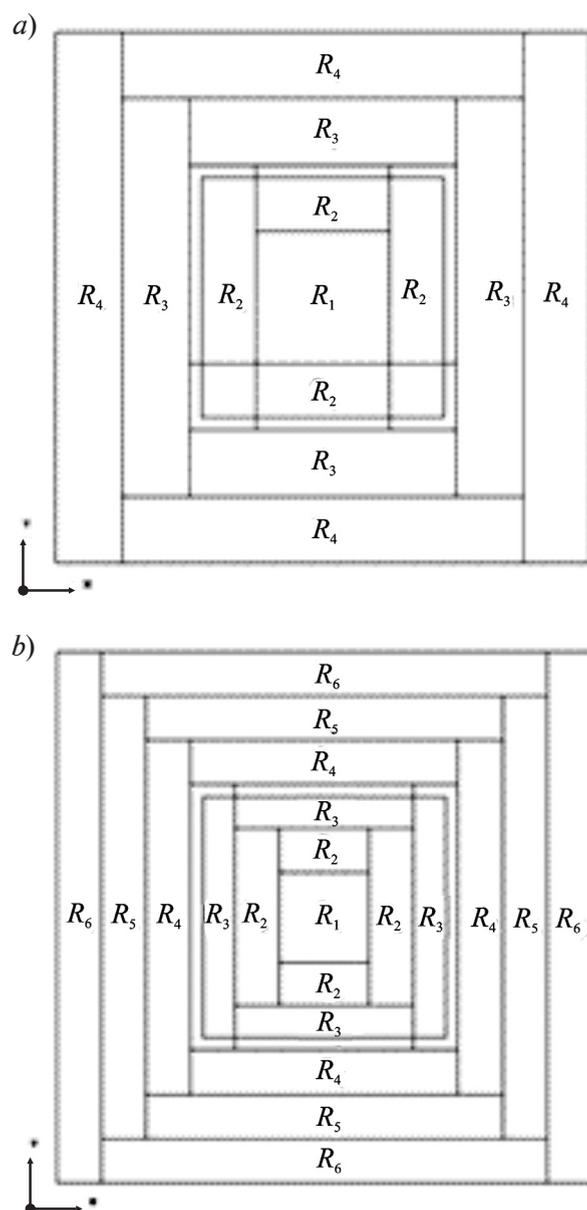


Рис. 7. Выбранные способы разбивки модели алюминиевой платы на 4 (а) и 6 (б) зон теплового сопротивления (R_i – сопротивление i -ой зоны)

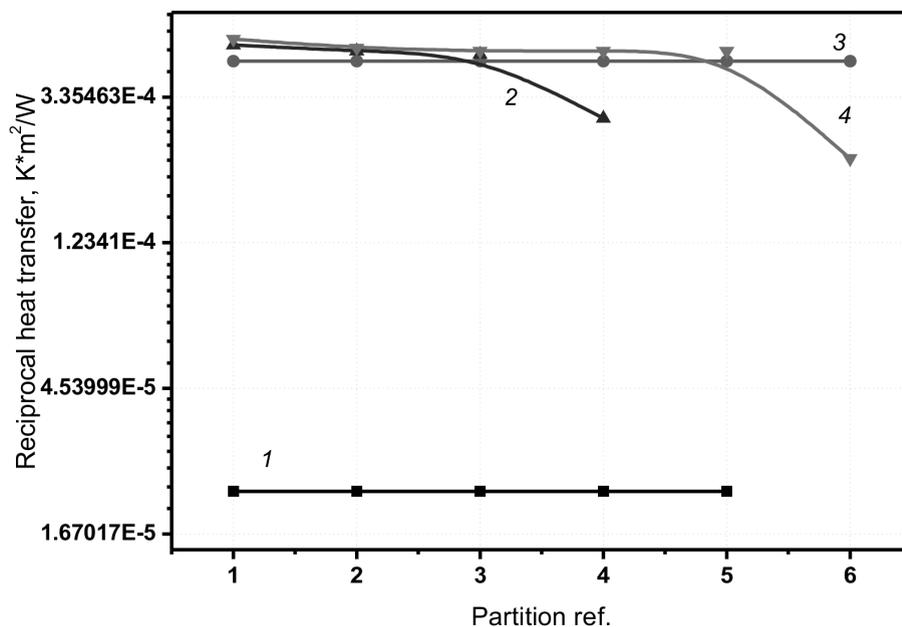


Рис. 8. Значения коэффициентов обратной теплопроводности, соответствующие различным зонам разбивки, по отношению к сопротивлению равномерного слоя термопасты: 1 – равномерный слой термопасты, 2 – четыре зоны разбивки, 3 – без разбивки на зоны, 4 – шесть зон разбивки

ными и смоделированными температурами приведены на рис. 6. Были протестированы результаты разбивки на различное число зон. Как видно из данных рис. 6, увеличение числа зон тепловых сопротивлений до шести не привело к существенной разнице в результатах, по сравнению с более грубой разбивкой.

Достигнутое хорошее согласие между моделируемыми и экспериментально полученными температурами в результате использования метода разбивки тепловых сопротивлений показано на рис. 6.

Результаты использования многозональной разбивки показывают, что тепловое сопротивление значительно ухудшается, начиная с зоны, расположенной рядом с краем алюминиевой пластины (то есть R_3 и R_5). Это согласуется с тем фактом, что под частью изогнутой алюминиевой платы непрерывного слоя термопасты не остается. Поскольку общая измеренная высота изгиба составила 80 мкм, а максимальная толщина слоя термопасты – 15 мкм, то площадь, заполненная термопастой, могла находиться только под зоной, соответствующей

тепловому сопротивлению R_4 (при разбивке на четыре зоны) и R_6 (при разбивке на шесть зон). Установленное путем калибровки модели эффективное тепловое сопротивление этих зон 0,1 К/Вт, было примерно в 10 раз хуже, чем тепловое сопротивление однородного слоя термопасты 0,011 К/Вт под недеформированной алюминиевой платой. Такое высокое значение можно объяснить деформацией алюминиевой платы вдоль краев при нагревании. Из результатов моделирования и температурных измерений также ясно, что влияние тепловой деформации алюминиевой платы на профиль температурного распределения СД-матрицы может быть представлено одним эффективным тепловым сопротивлением, как показано на рис. 6 и 8 – без разбивки. Использование этой альтернативы не имеет физического обоснования, однако приводит к удовлетворительному согласию между моделируемой и измеренной температурой.

Распределение температуры по площади светодиодной матрицы показано на рис. 9. Метод разбивки на тепловые сопро-

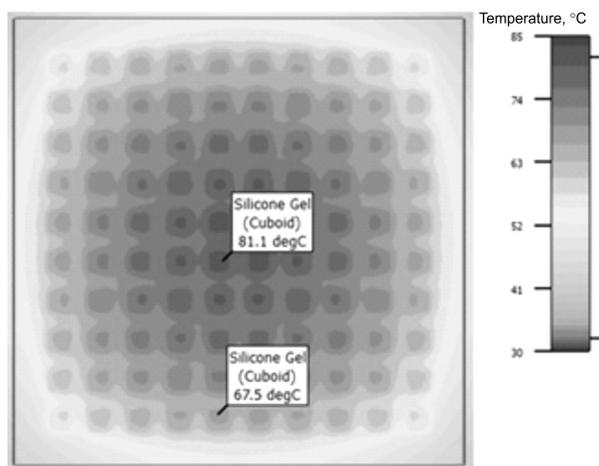


Рис. 9. Расчетная температурная карта поверхности СД-матрицы (с учетом тепловой деформации)

тивления позволяет прогнозировать формирование мест локального перегрева на поверхности матрицы, и тем самым воспроизводить эффект измеренной тепловой деформации алюминиевой платы.

Заключение

Тепловые свойства высокомошных белых светодиодных матриц AlInGaN на базе излучающих кристаллов «face-up», смонтированных по технологии «chip-on-board» на алюминиевой плате МРСВ, были исследованы экспериментально и путем компьютерного моделирования. В экспериментальных исследованиях были задействованы как косвенные методы определения тепловых параметров по переходным температурно-зависимым характеристикам, так и прямое определение температуры с помощью ИК-тепловидения.

В процессе проведенных исследований установлено, что значение общего теплового сопротивления СД-матрицы выросло в 1,7 раза при увеличении рабочего тока от 1 до 4 А, что вызвано значительным ухудшением отвода тепла от кристаллов, расположенных в центре матрицы, по сравнению с расположенными на периферии. Это есть следствие деформации из-за линейного теплового расширения, а именно — центральная часть выгибается при фиксации винтами за углы алюминиевой платы.

С увеличением зазора между этой платой и радиатором соответственно ухудшается тепловой контакт. Это подтверждается как распределением температуры, полученным из инфракрасного температурного мэппинга, так и непосредственным измерением кривизны поверхности СД-матрицы в рабочем режиме.

Необходимо подчеркнуть роль математического и экспериментального моделирования в выявлении и понимании наблюдаемого явления тепловой деформации. Небольшое изменение температуры поверхности, полученное в результате CFD-моделирования с однородным слоем термопасты, позволило авторам данной статьи выдвинуть гипотезу о тепловой деформации СД-матрицы как причине реально измеряемого температурного градиента. В дальнейшем результаты моделирования были подтверждены непосредственным измерением значительной высоты изгиба (до 80 мкм) алюминиевой платы в рабочем режиме.

Кроме того, был предложен метод разбивки теплового сопротивления на зоны и приведен пример CFD-моделирования экспериментальных образцов, хорошо согласующийся с тепловизионными результатами. Разница в температуре между центральными и периферийными чипами может достигать 13 К при входной мощности 100 Вт. Перегрев центральных чипов уменьшает срок службы СД-матрицы. Это следует учитывать при оценке значений теплового сопротивления, полученных методом релаксации прямого напряжения.

Наконец, представленная комбинация экспериментальных методов и методов моделирования поможет разработчикам электроники облегчить анализ и решение проблем надежности, вызванных образованием мест локального разогрева в светодиодной матрице в результате термомеханической деформации деталей матрицы в рабочих условиях.

Измерения светодиодных характеристик были произведены на базе Центра коллективного пользования «Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ping Zh., Jianhua Z., Xianping C., Miao C., Jing X., Daoguo Y. An experimental investigation of a 100-W high-power light-emitting diode array using vapor chamber-based plate // *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 7. No. 11. Pp. 1–7.
2. Jiajie F., Chaoyi X., Cheng Q., Xuejun F., Guoqi Z. Luminescence mechanism analysis on high power tunable color temperature Chip-on-Board white LED modules // *Proceedings of the 18th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*. 3–5 April 2017. Dresden, Germany, 2017. Pp. 1–6.
3. John H.L. Chip on board. Technology for multichip modules. New York: Springer, 1994. 556 p.
4. Konsowski S.G., Helland A.R. Electronic packaging of high speed circuitry. New York: McGraw Hill Professional, 1997. 445 p.
5. Шушарин А.Г., Половинка М.П., Морозов В.В. Медицинское тепловидение – современные возможности метода // *Современные проблемы науки и образования*. 2011. № 4. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=4726>.
6. Ki S.C., Sun C.Y., Jae-Young K., Myung H.K., Seon Y.R., Hae Y.C., Geon H.K. Precise temperature mapping of GaN-based LEDs by quantitative infrared micro-thermography // *Sensors*. 2012. Vol. 12. No. 4. Pp. 4648–4660.
7. MicReD. T3Ster URL: <https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/>.
8. Thermal management for LED applications. Lasance C.J.M., Poppe A. (Eds). New York: Springer, 2014. 551 p.
9. ES-CABLV45P data sheet. 2017. URL: http://www.epistar.com.tw/upfiles/files_/ES-CABLV45P.pdf.
10. Аладов А.В., Булашевич К.А., Черняков А.Ф., Карпов С.Ю., Валюхов В.П., Закгейм А.Л. Тепловое сопротивление и неоднородность распределения электролюминесценции и температуры в мощных AlGaInN-светодиодах // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2015. № 2 (218) С. 74–83.
11. Schweitzer D., Pape H., Chen L., Kutscherauer R., Walder M. Transient dual interface measurement – A new JEDEC standard for the measurement of the junction-to-case thermal resistance // *Proceedings of the 27th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'11)*. 20 – 24 March, 2011. San Jose, USA. Pp. 222–229.
12. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. Apparatus for measurement of thermal impedance of high-power light-emitting diodes and LED assemblies // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016. Vol. 63. No. 6. Pp. 2431–2435.
13. Закгейм А.Л., Курышев Г.Л., Мизеров М.Н., Половинкин В.Г., Рожанский И.В., Черняков А.Е. Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии // *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 44. Вып. 3. С. 390–396.
14. Hopper R.H., Haneef I., Ali S.Z., Udrea F., Oxley C.H. Use of carbon micro-particles for improved infrared temperature measurement of CMOS MEMS devices // *Measurement Science and Technology*. 2010. Vol. 21. No. 4. Pp. 1–6.
15. Shukla R.P., Udupa D. Measurement of radius of curvature of cylindrical surfaces // *Journal of Optics (India)*. 2001. Vol. 30. No. 3. Pp. 131–142.
16. Mentor Graphics Corporation. Flotherm v.10.1 User Manual, 2014.
17. Silicone Gel. 2017. URL: <https://www.acc-silicones.com>.
18. Organo-silicon heat-conducting paste. Specifications. 2017. URL: <http://pripoi.ru>.
19. Zakgeim A.L., Chernyakov A.E. A measuring system for obtaining spectroradiometric, photocalorimetric, and thermal characteristics of semiconductor radiators // *Light and Engineering*. 2013. Vol. 21. No. 4. Pp. 64–70.

Статья поступила в редакцию 25.06.2018, принята к публикации 09.07.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛАДОВ Андрей Вальменович – старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
aaladov@mail.ioffe.ru

БЕЛОВ Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент Инженерной школы Университета Йончёпинг, г. Йончёпинг, Швеция.
Швеция, г. Йончёпинг, ул. Хутеригатан, 5
ilia.belov@ju.se.ru

ВАЛЮХОВ Владимир Петрович — доктор технических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Valyukhov@yandex.ru

ЗАКГЕЙМ Александр Львович — кандидат физико-математических наук, заведующий сектором Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
zakgeim@mail.ioffe.ru

ЧЕРНЯКОВ Антон Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая улица, 26
chernyakov.anton@yandex.ru

REFERENCES

- [1] **Zh. Ping, Z. Jianhua, C. Xianping C., et al.**, An experimental investigation of a 100-W high-power light-emitting diode array using vapor chamber-based plate, *Advances in Mechanical Engineering*. 7 (11) (2015) 1–7. <https://doi.org/10.1177/1687814015620074>.
- [2] **F. Jiajie, X. Chaoyi, Q. Cheng, et al.**, Luminescence mechanism analysis on high power tunable color temperature Chip-on-Board white LED modules, *Proc. of the 18th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, 3–5 April 2017, Dresden, Germany (2017) 1–6.
- [3] **H.L. John**, *Chip on board, Technology for multichip modules*, Springer, New York, 1994.
- [4] **S.G. Konsowski, A.R. Helland**, *Electronic packaging of high speed circuitry*, McGraw Hill Professional, New York, 1997.
- [5] **A.G. Shusharin, V.V. Morozov, M.P. Polovinka**, Medical infrared imaging — modern features of the method, *Modern problems of science and education*. (4) (2011), URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=4726>.
- [6] **S.C. Ki, C.Y. Sun, K. Jae-Young, et al.**, Precise temperature mapping of GaN-based LEDs by quantitative infrared micro-thermography, *Sensors*. 12 (4) (2012) 4648–4660.
- [7] MicReD. T3Ster, URL: <https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/>.
- [8] *Thermal management for LED applications*, C.J.M. Lasance, A. Poppe (Eds), Springer, New York, 2014.
- [9] ES-CABLV45P data sheet, 2017, URL: http://www.epistar.com.tw/upfiles/files_/ES-CABLV45P.pdf
- [10] **A.V. Aladov, K.A. Bulashevich, A.E. Chernyakov, et al.**, Thermal resistance and nonuniform distribution of electroluminescence and temperature in high-power AlGaInN light-emitting diodes, *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. (2 (218)) (2015) 151–158.
- [11] **D. Schweitzer, H. Pape, L. Chen, et al.**, Transient dual interface measurement — A new JEDEC standard for the measurement of the junction-to-case thermal resistance, *Proc. of the 27th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'11)*, 20–24 March, 2011, San Jose, USA. (2011) 222–229.
- [12] **V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov**, Apparatus for measurement of thermal impedance of high-power light-emitting diodes and LED assemblies, *IEEE Transactions on Electron Devices*. 63 (6) (2016) 2431–2435.
- [13] **A.L. Zakgeim, G.L. Kuryshev, M.N. Mizerov, et al.**, A study of thermal processes in highpower InGaN/GaN FlipC-hip LEDs by IR thermal imaging microscopy, *Semiconductors*. 44 (3) (2010) 373–379.
- [14] **R.H. Hopper, I. Haneef, S.Z. Ali, et al.**, Use of carbon micro-particles for improved infrared temperature measurement of CMOS MEMS devices, *Measurement Science and Technology*. 21 (4) (2010) 1–6.
- [15] **R.P. Shukla, D. Udupa**, Measurement of radius of curvature of cylindrical surfaces, *Journal of Optics (India)*. 30 (3) (2001) 131–142.
- [16] Mentor Graphics Corporation. Flotherm v.10.1 User Manual (2014).
- [17] Silicone Gel, 2017, URL: <https://www.>

acc-silicones.com.

[18] Organo-silicon heat-conducting paste, Specifications, 2017, URL: <http://pripoi.ru>.

[19] A.L. Zakgeim, A.E. Chernyakov, A

measuring system for obtaining spectroradiometric, photocolometric, and thermal characteristics of semiconductor radiators, Light and Engineering.

21 (4) (2013) 64–70.

Received 25.06.2018, accepted 09.07.2018.

THE AUTHORS

ALADOV Andrey V.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
aaladov@mail.ioffe.ru

BELOV Ilia V.

Jönköping University, School of Engineering
5 Gjuterigatan St., Jönköping, Sweden
ilia.belov@ju.se.ru

VALYUKHOV Vladimir P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
Valyukhov@yandex.ru

ZAKGEIM Alexander L.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
zakgeim@mail.ioffe.ru

CHERNYAKOV Anton E.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
chernyakov.anton@yandex.ru