

Анализ эксплуатационных характеристик разнотипных светодиодных модулей¹

К. ГХОШ, Д. РАУЛ

Школа науки, техники и проектирования освещения Джадавпурского университета, Колката, Индия
E-mail: kamalikhosh4@gmail.com, debashis.raul@gmail.com

Аннотация

Светодиодные источники света идут на смену традиционным разрядным и др. Но хотя заявленный срок службы их очень высок, в тропических странах он очень мал, что препятствует применению этих источников в тропиках. Для выяснения причины данной ситуации требовался тщательный анализ ряда эксплуатационных характеристик светодиодных источников света, особенно при разных условиях окружающей среды.

Авторы экспериментировали с разными типами коммерчески доступных светодиодных модулей. Предполагалось, что указанная проблема обуславливается температурным фактором, и потому тестирование касалось таких зон светодиодных модулей, как излучающие кристаллы и поверхность радиатора. Детальный анализ полученных результатов при разных внешних условиях с достаточной вероятностью связывает неудачу попытки использования в тропиках светодиодных источников света с высокой температурой окружающей среды и малостью зоны тепловыделения в них.

Ключевые слова: кристалл-на-плате (COB), радиатор, кристалл, устройство поверхностного монтажа (SMD), температура.

1. Введение

Светодиодный (СД) источник света – безртутный, малоопасный, малоэнергетичный и высокоэнергоэффективный полупроводниковый прибор. Диапазон его применений широк – от информационного до заливающего освещения. Это полупроводниковый прибор с *p-n*-переходом, где происходит рекомбинация носителей и высвобождается энергия в виде фотонов светового излучения [1, 2]. При этом лишь часть электроэнергии преобразует-

ся в световую, а остальная переходит в тепло, определяющее температуру этого перехода [3–6], очень важный параметр, серьёзно влияющий на световой поток, надёжность и срок службы СД источников света. Значительную часть выделяемого тепла нужно

удалять (кондуктивно-конвективно): чрезмерный нагрев снижает эффективность таких источников. Поэтому производят ограничение температурного режима этих устройств. Так, согласно этому, СД модули (СДМ) со светодиодами поверхностного монтажа (SMD) (далее – SMD СДМ) и типа «кристалл-на-плате» (COB) (далее – COB СДМ) нуждаются в управлении их тепловым режимом, минимизирующим вредоносность выделяемого тепла. Максимальная температура *p-n*-перехода упакованного кристалла определяется допустимым уровнем термического напряжения, но поддерживать её на номинальном «каталожном» уровне практически невозмож-



Рис. 1. Температурные измерения СДМ без УУ с помощью тепловизора («Fluke» Ti 400)

Рис. 2. ИК изображение COB СДМ ТБ в пусковой период*

*Температура по Цельсию = (температура по Фаренгейту – 32)·5/9

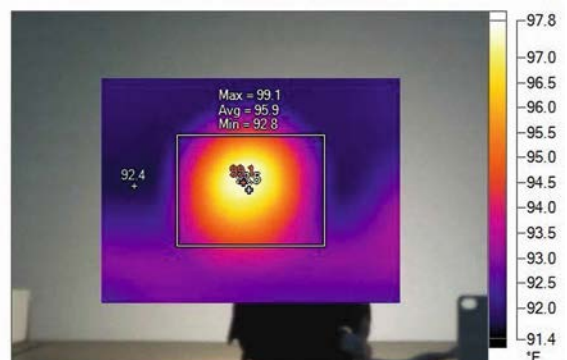
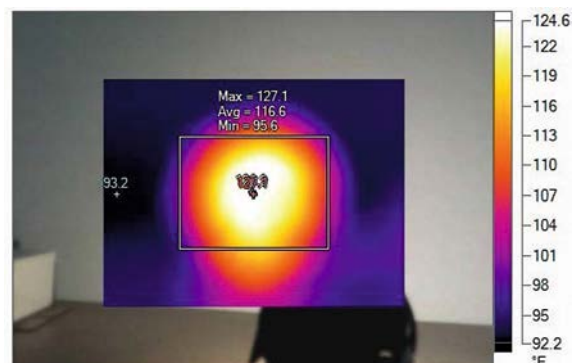


Рис. 3. ИК изображение COB СДМ ТБ после 60 мин горения*

*Температура по Цельсию = (температура по Фаренгейту – 32)·5/9



¹ Перевод с англ. С.Г. Ашуркова

Характеристики СДМ

№ п/п	Тип СДМ	Номинальная мощность, Вт	Размеры, мм		Вид монтажа	Материал радиатора	Принцип построения СД матриц
			Диаметр	Высота			
1	SMD ТБ	6	120	12	Поверхностный «заподлицо»	Алюминиевый сплав	Комбинация параллельно-последовательных соединений корпусированных СД
2	SMD ХБ						
3	COB ТБ	5	88	40	Потолочный «заподлицо»	Алюминиевый сплав	Комбинация небольших встроенных кристаллов
4	COB ХБ						

но из-за дисбаланса тепловых потоков в этих СД устройствах.

Эксперименты проводились на СДМ четырёх типов одного бренда – SMD и COB СДМ тёпло-белого (ТБ) и холодно-белого (ХБ) света (табл. 1) при прямом токе каждого из них 300 мА.

2. Эксперименты

Эксперименты заключались в измерениях температуры всех кристаллов и поверхности радиатора СДМ. Для этого использовался тепловизор (бренд «Fluke», модель Ti 400). Оба COB СДМ (ТБ и ХБ) имели алюминиевый радиатор и их коррелированные цветные температуры $T_{кц}$, соответственно были 3000 и 6500 К. Аналогично, оба SMD СДМ (ТБ и ХБ) имели те же $T_{кц}$. Измерения проводились при температуре окружающей среды $T_a \approx 28^\circ\text{C}$. Продолжительность измерений составляла 60 мин.

2.1. Методика

Вначале термопарным термометром измерялась T_a , а тепловизором – температуры кристаллов и поверхности радиатора (рис. 1). Измерения проводились при работе СДМ в двух режимах: с использованием устройства управления (УУ) или с питанием от источника постоянного тока без использования УУ. Результаты записывались в момент включения СДМ и затем через каждые 5 мин в течение 1 ч.

2.2. Результаты и их обсуждение

Ниже приводятся результаты измерений и полученные по ним графические характеристики, а также – в режимах работы с УУ – ИК изображения. На рис. 2 и 3 максимальная температура поверхности

Рис. 4. ИК изображение COB СДМ ХБ в пусковой период*

*Температура по Цельсию = (температура по Фаренгейту – 32)·5/9

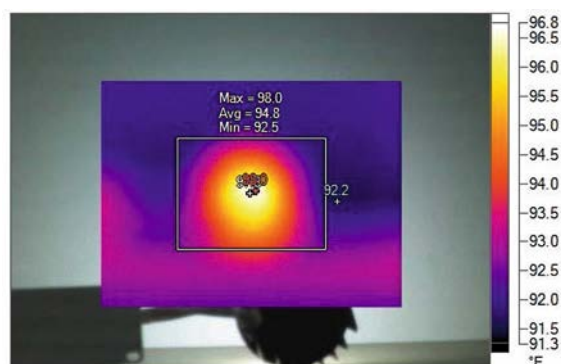


Рис. 5. ИК изображение COB СДМ ХБ после 60 мин горения*

*Температура по Цельсию = (температура по Фаренгейту – 32)·5/9

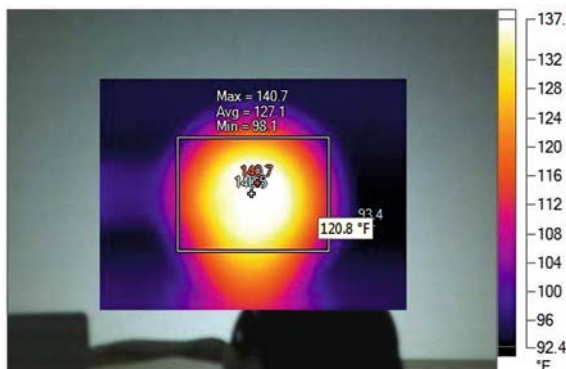
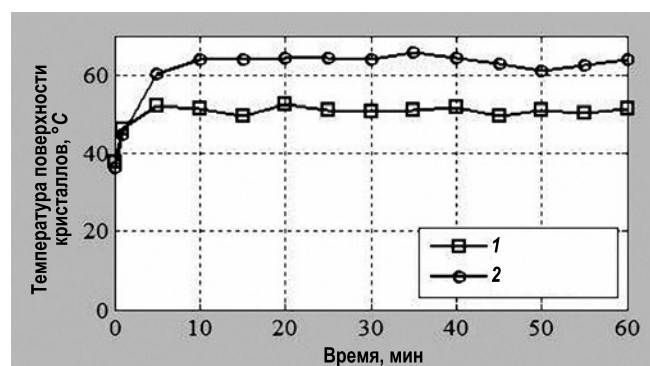


Рис. 6. Временная зависимость температуры поверхности кристаллов COB СДМ ТБ (1) и ХБ (2)

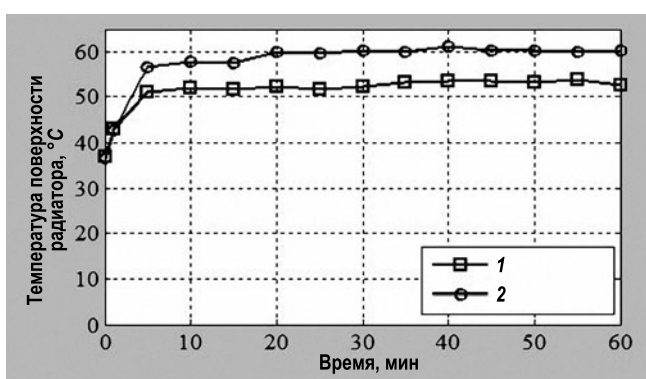


радиатора COB СДМ ТБ при включении последнего равна $37,27^\circ\text{C}$ ($99,1^\circ\text{F}$), а через 60 мин горения – $52,8^\circ\text{C}$ ($127,1^\circ\text{F}$). Аналогичные данные для COB СДМ ХБ – $36,6^\circ\text{C}$ (98°F) и $60,3^\circ\text{C}$ ($140,7^\circ\text{F}$) соответственно (рис. 4 и 5).

В COB СДМ ТБ температура поверхности кристаллов непостоянна. За первые 5 мин горения она повышалась примерно до 52°C , а затем в последующие 10 мин немного снижалась, примерно до 50°C . По сравнению с этим, в COB СДМ ХБ за первые 10 мин го-

Измеренные временные зависимости температуры поверхности радиатора *COB* СМД ТБ и ХБ

Температура поверхности радиатора, °С				
Время, мин	<i>COB</i> СМД ТБ		<i>COB</i> СМД ХБ	
	без УУ	с УУ	без УУ	с УУ
Начальное	29,6	37,0	31,1	36,6
1	36,9	43,0	51,7	42,7
5	45,6	51,2	50,7	56,6
10	53,8	52,0	59,8	57,9
15	54,1	51,6	60,3	57,6
20	56,1	52,2	60,2	59,8
25	56,2	51,7	60,9	59,5
30	54,4	52,2	62,0	60,1
35	55,7	53,3	59,4	59,9
40	55,9	53,4	60,4	61,2
45	54,7	53,5	61,5	60,3
50	55,5	53,2	61,9	60,2
55	56,1	53,7	60,8	59,8
60	55,5	52,7	61,3	60,3

Рис. 7. Временная зависимость температуры поверхности радиатора *COB* СМД ТБ (1) и ХБ (2)

в СМД ХБ), затем практически не менялась (рис. 7).

Что касается *SMD* СМД ТБ и ХБ, то температура поверхности кристаллов в них в первые 15 мин горения растёт, затем 5 мин падает и далее, слегка поднявшись, практически не меняется (рис. 8). Таким образом, эта температура вначале меняется, затем стабилизируется – устанавливается равновесие между выделяемым и кондуктивно отводимым теплом. При этом температура в *SMD* СМД ТБ выше, чем в *SMD* СМД ХБ.

Температура поверхности радиатора в обоих *SMD* СМД (ТБ и ХБ) в первые 5 мин горения очень быстро растёт (рис. 9). Затем тепло, поступающее от кристаллов, начинает рассеиваться радиатором в окружающую среду, и, соответственно, данная температура стабилизируется; причём её уровень в *SMD* СМД ХБ немного ниже, чем в *SMD* СМД ТБ.

Начальная температура поверхности радиатора у обоих *COB* СМД в режиме включения с УУ устанавливалась выше, чем без УУ (табл. 2), но после первых 10–35 минут горения температура радиатора во втором ре-

жения температура повышалась до 63,8 °С, а затем до 60-й мин горения составляла 64 °С (рис. 6). При этом в обоих случаях T_a равнялась 29 °С.

Подобным же образом, температура поверхности радиатора в обоих *COB* СМД в первые 5 мин горения росла (в СМД ТБ несколько меньше, чем

Измеренные временные зависимости температуры поверхности радиатора *SMD* СМД ТБ и ХБ

Температура поверхности радиатора °С				
	<i>SMD</i> СМД ТБ		<i>SMD</i> СМД ХБ	
Время, мин	без УУ	с УУ	без УУ	с УУ
Начальное	25,5	38,2	32,5	36,1
1	27,6	41,9	36,6	38,4
5	32,8	45,9	43,0	44,1
10	35,5	46,1	45,9	45,6
15	36,7	47,8	49,4	46,1
20	37,0	47,5	52,8	46,1
25	37,5	47,2	54,4	45,9
30	42,8	47,0	54,8	45,7
35	50,4	45,6	55,9	45,7
40	48,0	47,5	55,1	45,8
45	47,0	45,7	53,4	43,9
50	47,0	47,3	56,3	42,6
55	47,7	46,8	55,4	45,6
60	46,2	47,6	55,4	45,8

жиме становилась выше, чем в первом (рис. 10 и 11).

Временные зависимости температуры поверхности радиатора *SMD* СМД ТБ и ХБ в обоих указанных режимах включения приведены в табл. 3. В случае *SMD* СМД ХБ при включении без УУ эта температура после первых 10 мин горения растёт (рис. 12), а в случае *SMD* СМД ТБ при таком же включении она в первые 25 мин горения ниже, чем при включении с УУ, а затем различие почти исчезает (рис. 13).

Динамика освещённости от *COB* СМД ТБ и ХБ в пусковой период и в процессе горения показана на рис. 14, а от *SMD* СМД ТБ и ХБ – на рис. 15. При этом освещённость измерялась на расстоянии 1 фут (0,3048 м) от каждого СМД.

3. Расчёт температуры поверхности радиатора

Расчитывалась температура поверхности радиаторов только двух типов *COB* СМД.

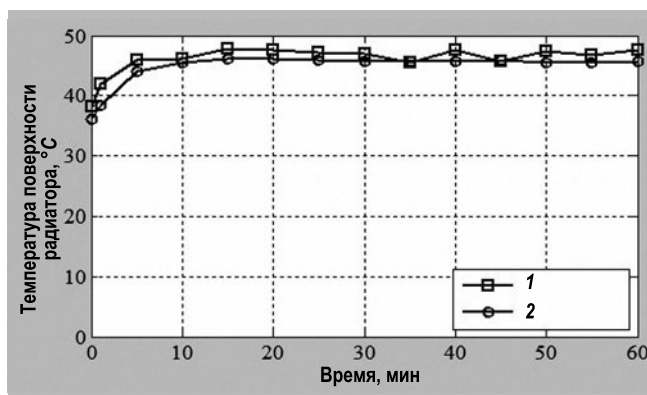


Рис. 9. Временная зависимость температуры поверхности радиатора *SMD* СМД ТБ (1) и ХБ (2)

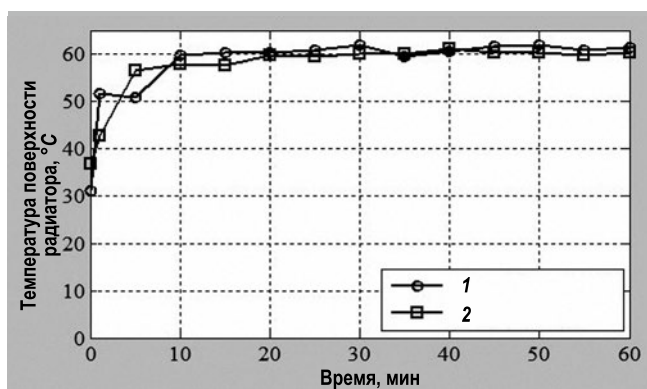


Рис. 10. Временная зависимость температуры поверхности радиатора *COB* СМД ХБ при включении без (1) и с (2) УУ

Расчётные и измеренные значения температуры поверхности радиатора СОВ СМД ХБ и ТБ

Параметры	Температура поверхности радиатора, °C	
	СОВ СМД ХБ	СОВ СМД ТБ
Расчётное значение	63,096	58,096
Измеренное значение	60,772	55,272

Рис. 11. Временная зависимость температуры поверхности радиатора СОВ СМД ТБ при включении без (1) и с (2) УУ

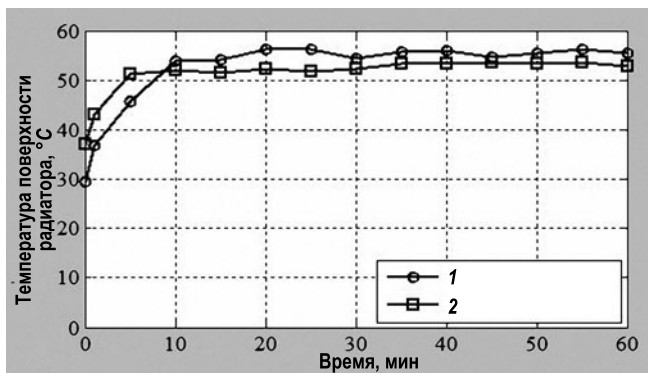


Рис. 12. Временная зависимость температуры поверхности радиатора SMD СМД ХБ при включении без (1) и с (2) УУ

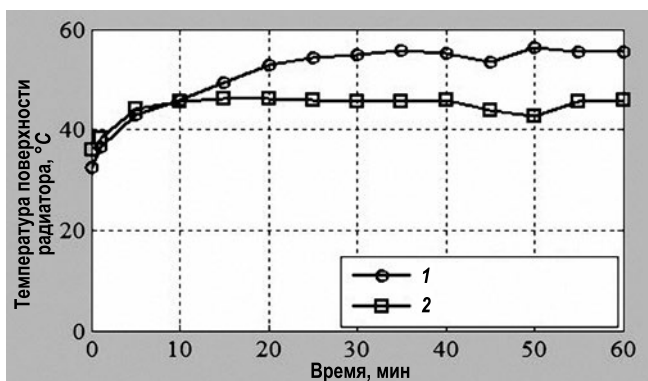


Рис. 13. Временная зависимость температуры поверхности радиатора SMD СМД ТБ при включении без (1) и с (2) УУ

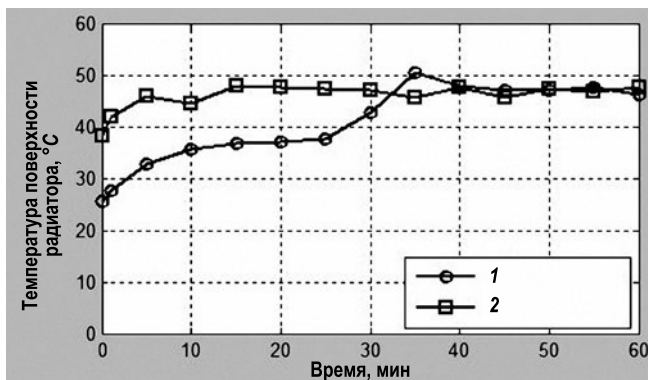
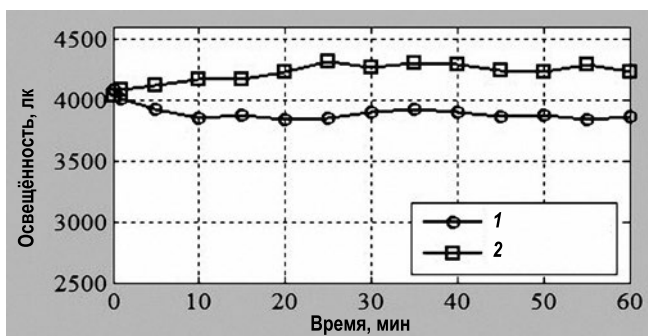


Рис. 14. Временная зависимость освещённости от СОВ СМД ТБ (1) и ХБ (2), в соответствии с текущей температурой поверхности радиатора



Максимальное значение температуры их корпуса $T_c = 85^\circ\text{C}$, $T_a = 45^\circ\text{C}$ (по каталожным данным производителя), прямой ток СД $I_D = 300\text{ мА}$, прямое напряжение постоянного тока СДМ $V_f = 18\text{ В}$, мощность системы = 5,4 Вт.

• В случае СОВ СМД ХБ

Максимальное значение температуры $p-n$ -перехода $T_j = 105^\circ\text{C}$, а тепловое сопротивление СДМ $R_{j-c} = 3,6^\circ\text{C/Вт}$.

Соответственно, максимальная температура, «добавляемая» всей конструкцией СДМ, $T_j - T_a = 60^\circ\text{C}$.

Допустим, требуется рассеивать мощность P_d , равную 80 % от всей мощности: $P_d = 0,8 (80\%) \cdot 5,4 = 4,32\text{ (Вт)}$. При этом тепловое сопротивление слоя смазки между СДМ и радиатором $R_b = 0,4^\circ\text{C/Вт}$.

Соответственно, расчётное значение температуры корпуса модуля $T_c' = T_j - R_{j-c} \cdot P_d = 89,448 (^\circ\text{C})$, а расчётное значение температуры контактирующей со смазкой поверхности радиатора $T_b = T_c' - R_b \cdot P_d = 87,72 (^\circ\text{C})$.

Расчётное значение температуры наружной поверхности радиатора $T_a' = T_b - R_{th} \cdot P_d = 87,72 - 5,7 \cdot 4,32 = 63,096 (^\circ\text{C})$. (Здесь тепловое сопротивление радиатора $R_{th} = 5,7^\circ\text{C/Вт}$.) А измеренное среднее значение $T_a' = 60,772^\circ\text{C}$.

• В случае СОВ СМД ТБ

$$T_j = 100^\circ\text{C}$$

$$R_{j-c} = 3,6^\circ\text{C/Вт}$$

$$T_j - T_a = 55^\circ\text{C}$$

$$P_d = 0,8 \cdot 5,4 = 4,32\text{ (Вт)}$$

$$R_b = 0,4^\circ\text{C/Вт}$$

$$T_b = T_c' - R_b \cdot P_d = 84,448 - 0,4 \cdot 4,32 = 82,72 (^\circ\text{C})$$

$$T_a' = T_b - R_{th} \cdot P_d = 82,72 - 5,7 \cdot 4,32 = 58,096 (^\circ\text{C})$$

А измеренное среднее значение $T_a' = 55,272^\circ\text{C}$.

Итоги вышеприведённых расчётов см. в табл. 4.

4. Сравнение расчётных и измеренных температур

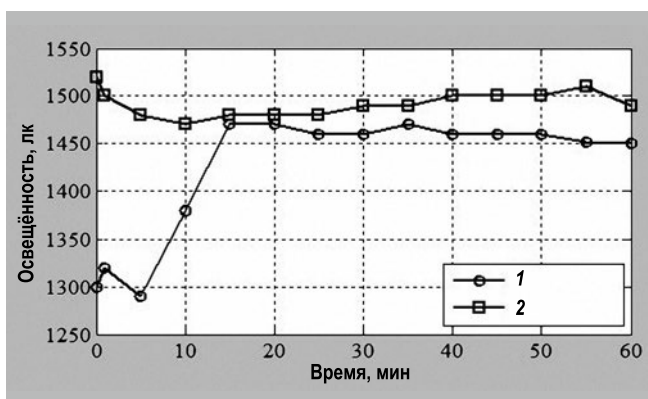
Измеренные (T_{meas}) температуры проверялись сравнением с расчётными (T_{cal}) с помощью моделирования. При этом для оценки точности прогноза по математической модели использовались статистические показатели. Безразмерные статистические показатели – отклонение разности средних (ОРС) и среднеквадратическое отклонение (СКО) выражаются как некоторые доли соответствующих

Таблица 5

Статистические различия расчётных и экспериментальных данных

Температура поверхности радиатора, °C	СКО, %	ОПС, %	СПО, %
COB СМД ХБ	+ 0,048	+ 4,79	+ 3,824
COB СМД ТБ	+0,071	+ 7,17	+6,67

Рис. 15. Временная зависимость освещённости от SMD СДМ ТБ (1) и ХБ (2), в соответствии с текущей температурой поверхности радиатора



средних значений температур (T_{mean}) на соответствующем отрезке времени:

$$ОПС = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_{cal,i} - T_{meas,i})}{N \cdot T_{mean}} \right] \cdot 100,$$

$$СКО = \left(\frac{1}{T_{mean}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{cal,i} - T_{meas,i})^2}{N}}.$$

Среднее процентное отклонение (СПО) T_{cal} от T_{meas} определяется как

$$СПО = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{T_{cal,i} - T_{meas,i}}{T_{meas,i}} \right]}{N} \cdot 100.$$

Оценки рассогласований значений указанных расчётных и измеренных температур приведены в табл. 5.

5. Заключение

Для исследования природы температурных различий между однобрендовыми COB и SMD СДМ было выполнено несколько экспериментов. Эти СДМ имеют ряд светотехнических применений. Поэтому надо учитывать их температурные зависимости от наружных условий. Температуры кристаллов и поверхности радиатора

у COB СДМ ТБ ниже, чем у COB СДМ ХБ, а у SDM СДМ ТБ они выше, чем у SDM СДМ ХБ. Ещё одной целью данной работы было определение указанных температур при питании СДМ непосредственно от источника постоянного тока, т.е. без УУ; в этом режиме включения температуры приблизительно выше, чем в режиме с УУ. С помощью приведённых в статье результатов температурных исследований проектировщики изделий с СД смогут сочетать конструктивные решения с надлежащим управлением тепловым режимом.

Авторы благодарят Правительство Западной Бенгалии, Индия, за выделение дотации, а Школу науки, техники и проектирования освещения за предоставление экспериментальной установки для завершения данной работы, выполнявшейся в светотехнической лаборатории Джадавпурского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Narendran N., Gu Y., Freyssinier-Nava J.P., Zhu Y. Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency // Rapid Research letters. – DOI 10.1002/pasa.200510015, R60–62, 2005.
2. Schubert E Fred, Cho Jaehee, Kim Jong Kyu Light Emitting Diodes. – Elsevier, oi:10.1016/B978-0-12-803581-8.01081-X, 2016.

3. Keppens A., Ryckaert W.R., Deconinck G., Hanselaer P. High power light-emitting diode junction temperature determination from current voltage characteristics // Journal of Applied Physics. – 104, 093104–1–8, 2008, DOI: 10.1063/1.3009966.

4. Chernyakov A.E., Zakgeim A.L., Bulashevich K.A., Karpov S. Yu., Smirnov V.I., Sergeev V.A. Theoretical and Experimental Study of Thermal Management in High-Power AlInGaN LEDs / IEEE2014 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE2014, ISBN-78–1–4799–4790–4, 2014.

5. Elger Gordon, Hanss Alexander, Schmid Maximilian, Wipiejewski Totsten // Application of thermal analysis for the development of reliable high power LED modules / Solid State Lighting (SSLCHINA), 2014 11th China International Forum, ISBN- 978–1–4799–6696–7, pp: 158–164, 2014.

6. Guo Yu, Pan Kai-lin, Ren Guo-tao, Chen Shu-jing, Yuan Fei Research on LED temperature characteristic and thermal analysis at low temperatures / Electronic Packaging Technology and High Density Packaging (ICEPT-HDP), 2012 13th International Conference, ISBN-978–1–4673–1682–8, pp-1411–1415, Aug. 2012.



Камалика Гхосх (Kamalika Ghosh), B.E., M.E.

и Ph.D. Доцент Школы науки, техники и проектирования освещения Джадавпурского университета. Пожизненный член Института

инженеров, Индия, и Индийского общества инженеров-светотехников. Автор около 30 статей



Дебашис Раул (Debashis Raul), B. Tech.

и M.E. Приглашённый преподаватель и старший исследователь Школы науки, техники и проектирования освещения Джадавпурского университета